

TNO-rapport  
PML 1998-A56

## Berekening van de ontwerpbelastingen voor de schiettunnels voor de nieuwbouw van DMKL/AB te Oldebroek

TNO Prins Maurits Laboratorium

*Werkverslagen*

Lange Kleiweg 137  
Postbus 45  
2280 AA Rijswijk

Telefoon 015 284 28 42  
Fax 015 284 39 58

Datum  
oktober 1998

Auteur(s)  
Ir. R.M.M. van Wees  
Ir. A.C. van den Berg  
Dr. E.M. Salomons (TNO-TPD-TU Delft)

Reproduced From  
Best Available Copy

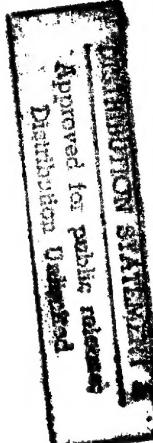
Rubricering  
Vastgesteld door : Ing. W.R. de Graaf  
Vastgesteld d.d. : 8 september 1998  
(deze rubricering wijzigt niet)

Titel : Ongerubriceerd  
Managementuitreksel : Ongerubriceerd  
Samenvatting : Ongerubriceerd  
Rapporttekst : Ongerubriceerd  
Bijlagen A - D : Ongerubriceerd

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar  
gemaakt door middel van druk, foto-  
kopie, microfilm of op welke andere  
wijze dan ook, zonder voorafgaande  
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
Algemene Voorwaarden voor Onder-  
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel  
de betreffende terzake tussen de  
partijen gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het  
TNO-rapport aan direct belang-  
hebbenden is toegestaan.

Exemplaarnr. : 16  
Oplage : 32  
Aantal pagina's : 57 (incl. bijlagen,  
excl. RDP & distributielijst)  
Aantal bijlagen : 4



19990112 078

© 1998 TNO

TNO Prins Maurits Laboratorium is onderdeel  
van de hoofdgroep TNO Defensieonderzoek  
waartoe verder behoren:

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium  
TNO Technische Menskunde



AQF99-04-0578

Nederlandse Organisatie voor toegepast-  
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

## Managementuittreksel

Titel : Berekening van de ontwerpbelastingen voor de schiettunnels voor de nieuwbouw van DMKL/AB te Oldebroek  
Auteur(s) : Ir. R.M.M. van Wees, Ir. A.C. van den Berg en Dr. E.M. Salomons (TNO-TPD-TU Delft)  
Datum : oktober 1998  
Opdrachtnr. : A98KL430  
Rapportnr. : PML 1998-A56

De Directie Materieel Koninklijke Landmacht, Afdeling Beproevingen (DMKL/AB) wil verhuizen naar de Legerplaats Oldebroek. Door de Dienst Gebouwen, Werken en Terreinen, Regionale Directie Gelderland (DGWT Gelderland) is hiervoor een complex van werkplaatsen ontworpen. Op enkele punten van het ontwerp had DGWT Gelderland behoefte aan ondersteuning. Het betrof explosie-veiligheid, dimensionering van de werkplaatsen op een accidentele explosie en de belasting op de schiettunnels die ontstaat bij vuren. Dit rapport betreft alleen het laatste punt. De andere punten worden behandeld in een apart rapport [Van Doormaal, in voorbereiding].

Naast het berekenen van de belastingen op de wanden van de tunnels wordt in dit rapport ook ingegaan op twee andere aspecten. Dit betreft het ontwerp van de ruimte rondom de kogelvanger van de 300 m schiettunnel en maatregelen ter bescherming tegen een exploderende schietbus.

Voor het bepalen van de ontwerpbelastingen worden eerst de dynamische belastingen ten gevolge van het vuren bepaald. Dit betreft met name de mondingsblast. Daarna wordt de equivalente statische belasting op wanden van diverse dikte en hoeveelheid wapening bepaald. Met behulp van deze gegevens kan de opdrachtgever verder op normale wijze de tunnels dimensioneren.

Het bleek dat de grootste bijdrage aan de belasting door de mondingsblast geleverd werd. Deze korte drukpuls was vrijwel constant over de lengte van de tunnel. De ruimte rondom de kogelvanger van de 300 m tunnel wordt belast door de effecten van detonerende granaten (blast en fragmenten). Tegen de fragmenten wordt een bekleding met staalplaat van de wanden voorgesteld. Als laatste punt zijn maatregelen voorgesteld tegen de effecten van een exploderende vuurbuis.

THIS COPY IS ACTUALLY AUTHENTICATED BY  
THE GOVERNMENT OF THE NETHERLANDS

## **Samenvatting**

Voor het ontwerp van een gesloten schiettunnel zijn de ontwerpbelastingen bepaald. De zwaarste deelbelasting was de mondingsblast.

## Inhoud

Managementuittreksel .....	2
Samenvatting .....	3
1 Inleiding .....	5
2 Belastingen .....	6
2.1 Mondingsblast .....	6
2.2 Quasi-statische druk .....	6
2.3 Kogelknal .....	7
2.4 Detonatie granaat .....	7
2.5 Gronddruk en eigen gewicht .....	8
2.6 Totale belasting .....	8
3 Equivalente statische belasting van mondingsblast en detonatie op tunnelwanden .....	9
3.1 Methode .....	9
3.2 Resultaten .....	11
4 Bekleding wanden rondom kogelvanger 300 m tunnel .....	13
5 Maatregelen tegen een onverwacht exploderende vuurbuis .....	17
6 Conclusies .....	18
7 Referenties .....	19
8 Ondertekening .....	21

Bijlagen:

- A Berekening van de mondingsblastbelasting
- B Berekening van de overige belastingen
- C Berekening van de equivalente statische belasting
- D Vergelijking van berekende mondingsblast met meetresultaten

## 1 Inleiding

De Directie Materieel Koninklijke Landmacht, Afdeling Beproevingen (DMKL/AB) wil verhuizen naar de Legerplaats Oldebroek. Door de Dienst Gebouwen, Werken en Terreinen, Regionale Directie Gelderland (DGWT Gelderland) is hiervoor een complex van werkplaatsen ontworpen. Op enkele punten van het ontwerp had DGWT Gelderland behoefte aan ondersteuning. Het betrof explosieveiligheid, dimensionering van de werkplaatsen op een accidentele explosie en het bepalen van de belasting van de schiettunnels die ontstaat bij vuren. Dit rapport betreft alleen het laatste punt. De andere punten worden behandeld in een apart rapport [Van Doormaal, in voorbereiding].

Naast het berekenen van de belastingen op de wanden van de tunnels wordt in dit rapport ook ingegaan op twee andere puntjes. Dit betreft het ontwerp van de ruimte rondom de kogelvanger van de 300 m schiettunnel en maatregelen ter bescherming tegen een exploderende schietbuis.

Voor het bepalen van de ontwerpbelastingen op de wanden worden eerst de grootte van de schokgolven ten gevolge van het vuren bepaald. Dit betreft met name de mondingsblast. Daarna wordt de equivalente statische belasting op wanden van diverse dikte en stijfheid bepaald.

In het hoofdgedeelte van het rapport worden de berekeningen kort besproken en de resultaten gepresenteerd. In de bijlagen worden de berekeningen uitvoerig gepresenteerd.

## 2 Belastingen

In dit hoofdstuk worden de belastingen die op de tunnelwanden werken kort besproken. De bepaling van de belastingen staat in bijlagen A en B.

### 2.1 Mondingsblast

De knallen die ontstaan bij het afvuren van wapens in de tunnel leveren een blastbelasting op de tunnelwanden op. Het is bekend dat de drukken van mondingsblast tientallen kPa kunnen bedragen, wat bepalend zou kunnen zijn voor de dimensionering van de wanden. Daarom is in bijlage A de mondingsblast die optreedt op de wand van de tunnel geschat met behulp van een numerieke simulatie. Het resultaat voor het zwaarste wapen was een schokgolf met een piekdruk van 100 kPa en een faseduur van 1,5 ms. Dit geeft een impuls van 75 Pa.s. Verder zullen reflecties optreden, zodat de wanden meerdere keren belast worden door dezelfde schokgolf. Om dit in rekening te brengen moet de impuls van de schokgolf met 50% verhoogd worden. Om onzekerheden in de berekeningsmethode en stochastische variaties in rekening te brengen wordt een belastingsfactor van 1,3 genomen. De tunnelwanden dienen dus op een impuls van 146 Pa.s ontworpen te worden.

De verdeling van mondingsblast over de lengte van de tunnel zal vrij gelijkmataig zijn. De piekdruk neemt iets af met de afstand, maar de faseduur neemt toe, zodat de impuls praktisch gelijk blijft.

De schokgolf van de mondingsblast is een zeer korte belasting en de tunnelwanden zullen zo traag reageren dat ze hun maximale uitbuiging pas bereiken als de schokgolf allang gepasseerd is. Dit heeft als gevolg dat de maximale uitbuiging kleiner is dan bij een statische overdruk van 195 kPa (= 100 kPa x 1,5 x 1,3). Deze uitbuiging wordt bepaald in hoofdstuk 3 en omgerekend naar een equivalente statische belasting.

Andere onderdelen, zoals de scheidingswand, lichtarmaturen of andere apparatuur zouden veel sneller kunnen reageren, afhankelijk van hun massa en stijfheid. De maximale belasting die zo'n onderdeel kan ervaren (dat wil zeggen de maximale equivalente statische belasting) is tweemaal de piekdruk van de schokgolf, dus 200 kPa. In andere woorden: als een onderdeel bestand is tegen 200 kPa statische druk is het ook bestand tegen de mondingsblast. Indien voor die apparatuur ook dezelfde reflectiefactor en veiligheidsfactor van toepassing is wordt die druk  $1,5 \times 1,3 \times 200 \text{ kPa} = 390 \text{ kPa}$ .

### 2.2 Quasi-statische druk

Bij het vuren komen de kruitdampen vrij in de tunnel, een afgesloten ruimte. Verder zullen de kruitdampen naverbranden met de lucht uit de tunnel. Dit levert een drukverhoging in de tunnel op, die de quasi-statische druk (QSP) wordt genoemd.

In bijlage B.3 is de QSP berekend. Deze bedraagt maximaal 38 kPa voor de 50 m schiettunnel en 11 kPa voor de 300 m tunnel. Als er een ontlastopening in de tunnel zit wordt de druk lager.

Bij deze waarden is geen extra belastingsfactor gehanteerd, aangezien het onwaarschijnlijk is dat het theoretische maximum in de praktijk gehaald wordt.

Behalve dat bij het ontwerp van de tunnelwanden met de QSP rekening gehouden moet worden, heeft de QSP ook enkele andere consequenties. Zo zullen de kruitdampen ook de bedieningsruimten 104 en 101 binnen willen stromen. Dit is vieze, giftige rook. De overdruk in de bedieningsruimten wordt dan gelijk aan de overdruk in de tunnel. De druk komt tevens op de ventilatiesystemen te staan. In bijlage B.3.3 worden mogelijke tegenmaatregelen gegeven.

### 2.3 Kogelknal

Met de kogelknal wordt de schokgolf bedoeld die supersone projectielen genereren. Er is een ruwe, conservatieve schatting van de kogelknal gemaakt, zoals beschreven in bijlage B.4. Het bleek snel dat de kogelknal een te verwaarlozen belasting voor de wanden was, zodat geen nauwkeuriger berekening nodig was.

Overigens geldt deze uitspraak alleen voor de wanden, die traag reageren en dus op de impuls berekend moeten worden. Lichte stijve onderdelen zouden mogelijk berekend moeten worden op de overdruk maal een dynamische belastingsfactor. De in bijlage B.4 gegeven schatting van de overdruk is daarvoor niet nauwkeurig genoeg.

### 2.4 Detonatie granaat

In de 300 m tunnel wordt ook met brisante munitie geshoten. De projectielen hebben maximaal een netto explosieve massa van 0,150 kg.

In bijlage B.5 wordt de belasting ten gevolge van een detonerende granaat geschat, waarvan uitgegaan wordt van een minimale afstand tot de wand van 0,5 m. (Indien een granaat tegen de wand detoneert wordt schade geaccepteerd.) De ontwerpbelasting op de tunnelwanden bij de kogelvanger blijkt 400 Pa.s te zijn. Op 30 m van het detonatiepunt is de belasting afgенomen tot 133 Pa.s.

Op de positie van de deur 11 m voor de smashplate is de ontwerpimpuls 220 Pa.s en de ontwerpdruk 70 kPa. De belasting op de deur achter de kogelvanger kan niet geschat worden, aangezien deze deur niet direct door de schokgolven belast wordt. Wel is de belasting natuurlijk lager dan op de deur voor de smashplate.

## 2.5 Gronddruk en eigen gewicht

Grote delen van de tunnels liggen onder een grondtalud en worden dus ook belast met het gewicht van de grond en de gronddruk. Verder wordt het dak belast door zijn eigen gewicht.

## 2.6 Totale belasting

De belastingen kunnen in vele combinaties voorkomen. In feite is alleen het eigen gewicht van het dak altijd aanwezig. Bijzonder is dat de belasting van de mondingsblast en van de detonatie van de granaat zowel naar buiten als naar binnen kan werken. Dit komt doordat deze belastingen zo kort duren. Nadat de tunnelwand naar buiten is uitgebogen, veert ze weer terug (rebound). Dit kan zonder veel energieverlies gaan, zodat de negatieve uitbuiging vrijwel even groot is als de positieve. Door de verschillende trillingstijden van wand en dak is het mogelijk dat een uitbuiging naar buiten van het dak gecombineerd wordt met een uitbuiging naar binnen van de wand.

Verder hoeft geen rekening gehouden te worden met een combinatie van mondingsblast en blast van de detonatie van de granaat, zoals in bijlage B.5 wordt beredeneerd.

Van alle belastingscombinaties dient degene die de zwaarste belasting oplevert genomen te worden voor de dimensionering van de tunnels. Voor de 50 m schiettunnel was dit de combinatie: quasi-statische druk, mondingsblast op het dak (naar buiten gericht), mondingsblast op de wand (naar buiten gericht), eigen gewicht dak. Voor de 300 m schiettunnel was de ongunstigste combinatie: mondingsblast op het dak (naar binnen gericht), mondingsblast op de wand (naar binnen gericht), eigen gewicht dak, gronddruk op dak, gronddruk op wand. Als gegarandeerd kan worden dat de quasi-statische druk in de 50 m tunnel laag blijft (beneden 12 kPa door drukontlasting) wordt de belasting op de 50 m tunnel gelijk aan de belasting op de 300 m tunnel.

### 3      Equivalente statische belasting van mondingsblast en detonatie op tunnelwanden

#### 3.1    Methode

De belasting op de tunnelwanden ten gevolge van de mondingblast of de detonatie van een granaat is een korte puls. Voor de dimensionering van de wanden is een statische belasting veel handiger. In dit geval kan de pulsbelasting omgerekend worden naar een equivalente statische belasting, dat wil zeggen een belasting die dezelfde uitbuiging van de tunnelwand veroorzaakt. Dit kan doordat de tunnelwand lineair elastisch reageert. Voor zwaar plastisch vervormende constructies, zoals de cellen van de munitiewerkplaats, is dit niet mogelijk.

De methode is als volgt.

- Voor een wand met een bepaalde dikte en hoeveelheid wapening wordt de stijfheid en de massa uitgerekend. Dit wordt gedaan met de methoden uit TM 5-1300 [1990]. Aangenomen wordt dat de wand aan twee zijden is ingeklemd en in één richting draagt. Dit is een conservatieve aannname.
- Daarna wordt de massa van een equivalent één-massa-veer systeem berekend. Dit één-massa-veer systeem heeft dezelfde stijfheid en trillingstijd als de wand. Dit betekent dat de respons (uitbuiging in de tijd) van het equivalent één-massa-veer systeem onder een statische of dynamische belasting gelijk is aan dat van de wand.
- De volgende stap is het berekenen van de respons van het equivalent één-massa-veer systeem op de mondingsblast. Voor de vorm van de mondingsblast is een typische blastvorm aangenomen, een Friedlander-golf. De aangenomen duur van de overdruk was 1,5 ms en de impuls was 146 Pa.s. De trillingstijd van de wand was veel langer dan 1,5 ms, wat betekent dat de precieze duur en vorm van de belasting nauwelijks invloed heeft op de respons. De wand voelt een korte klap met een bepaalde intensiteit (de impuls).
- Uit de berekende maximale doorbuiging wordt de equivalente statische belasting van de mondingsblast berekend.
- Dit wordt herhaald voor een aantal diktes en wapeningpercentages.
- Doordat de respons lineair en de belasting een korte puls is, is de equivalente statische belasting recht evenredig met de impuls van de belasting. De equivalente statische belasting van de detonatie van de granaat kan dus simpel berekend worden uit de equivalente statische belasting van de mondingsblast en de verhouding tussen de impuls van de detonatie en de impuls van de mondingsblast.

Bijlage C geeft een voorbeeld van zo'n berekening, voor een zijwand met een dikte van 30 cm en een wapeningspercentage van 0,4%.

Bij deze berekeningen is een aantal aannames gemaakt. Deze worden hieronder besproken.

- Er is uitgegaan van een gewapend betonnen constructie, met betonkwaliteit B45 en wapeningstaal FeB 500 HWL.
- Er is uitgegaan van een symmetrische wapening, dat wil zeggen gelijke trek- en drukwapening, met  $a/h = 0,10$  (afstand van zwaartepunt van een wapeningsstaaf tot betonoppervlak gedeeld door dikte). Symmetrische wapening is nodig omdat de wand na het uitbuigen weer terugveert. Aangezien er nauwelijks energie verloren gaat, kan de terugvering even ver gaan als de uitbuiging. De equivalente statische belasting kan dus zowel naar buiten als naar binnen werken.
- De massa van de zanddekking of de wandbekleding bij de kogelvanger is niet meegenomen. Dit is een conservatieve aansname. De reden is dat niet zeker is of die massa ook inderdaad meebeveegt. Tussen wand en zanddekking zit een isolatielaag, wat wellicht ook als trillingsisolatie werkt. Verder zou zich na een paar schoten een klein kuilje in het zand kunnen vormen (de uitbuiging is slechts een fractie van een millimeter). Er is dus geen garantie dat er inderdaad zand direct achter de wand zit. Voor de wandbekleding geldt dat dit een apart veersysteem is.
- De lopende belasting van de schokgolf is geschematiseerd tot een gelijkmatig verdeelde belasting. Aangezien de in TM 5-1300 gebruikelijke methode voor die schematisatie in de tunnel niet opgaat, is de conservatieve aansname gemaakt dat de gelijkmatig verdeelde belasting even groot is als de lopende belasting. Geschat wordt dat dit slechts een kleine afwijking van de werkelijke belasting geeft.
- Er is een impulsbelasting aangenomen. Dit blijkt een goede aansname te zijn. De aangenomen faseduur van de belasting komt inderdaad overeen met de schatting van de belastingsduur van de mondingsblast en de blast van de detonatie van de granaat.
- De stijfheid van de tunnelwanden bij de eindwanden en bij nissen en dergelijke zal hoger zijn dan de aangenomen stijfheid van een vlakke, tweezijdig ingeklemde wand. Dit betekent dat ook de equivalente statische belasting daar hoger zal zijn. Dit zal grotendeels gecompenseerd worden door de hogere sterkte (doordat belastingsafdracht in meer richtingen mogelijk wordt). Voor stukken wand die alleen maar dikker worden zonder dat veel extra belastingsafdracht mogelijk is ligt dat anders. Dit zijn bijvoorbeeld de nissen waarin meetapparatuur geplaatst wordt. Deze stukken kunnen gedimensioneerd worden door aan te nemen dat de belasting daar gelijk is aan de belasting op een stuk wand met gelijke, maar constante dikte.
- Zoals tijdens een besprekking naar voren kwam wordt overwogen om de nissen voor meetapparatuur te maken door in plaats van een sparing, stukken beton op de wand te bevestigen. In dat geval moet de wand gedimensioneerd worden op de belasting die bij het dikste stuk wand hoort. Verder dient de bevestiging van

de stukken beton op de wand op dezelfde manier als de bevestiging van de staalplaten bij de ruimte rondom de kogelvanger uitgevoerd te worden. Dat wil zeggen, met circa vier M16 bouten per  $m^2$ , met een schotelveer onder de boutkop.

### 3.2 Resultaten

Tabel 3.1 geeft de berekende equivalente statische belasting  $p_{eqstat}$  voor de mondingsblast (146 Pa.s) en de detonatie van de granaat (400 Pa.s). Deze waarden worden gegeven voor diverse combinaties van dikte en wapeningspercentage. Verder worden de elastische stijfheid, de trillingstijd en de maximale zakkking onder de mondingsblast gegeven.

Nadat de wand naar buiten veert onder de pulsbelasting zal de wand terugveren. Aangezien er weinig energie verloren gaat, zal de terugvering vrijwel even groot zijn als de invering. Dit heeft tot gevolg dat de equivalente statische belasting zowel naar binnen als naar buiten kan werken.

Deze equivalente statische belastingen kunnen gebruikt worden om samen met de andere in hoofdstuk 2 bepaalde belastingen, de kritieke belastingscombinatie te bepalen.

Verder blijkt uit de responsberekening dat de maximale versnelling van de wand optreedt op het moment dat de piekdruk optreedt. De maximale versnelling is omgekeerd evenredig met de dikte van de wand. Voor een 30 cm dikke wand is de maximale versnelling ongeveer  $500 \text{ m/s}^2$ .

*Tabel 3.1: Equivalente statische belasting ten gevolge van een kortdurende blastbelasting, waarden voor 1 strekkende meter wand.*

Dikte [m]	Wapenings- percentage [%]	Stijfheid [N/m]	Trillingstijd [s]	Zakking [m]	Pegstat 146 Pa.s [kPa]	Pegstat 400 Pa.s [kPa]
<b>Zijwand, lengte 3,2 m</b>						
0,3	0,2	4,14E+08	0,0130	5,39E-04	70	191
0,3	0,4	4,47E+08	0,0125	5,18E-04	72	198
0,3	0,6	4,77E+08	0,0121	5,01E-04	75	204
0,3	0,8	5,06E+08	0,0118	4,85E-04	77	210
0,4	0,2	9,83E+08	0,0098	3,00E-04	92	252
0,4	0,4	1,06E+09	0,0094	2,88E-04	96	262
0,4	0,6	1,14E+09	0,0091	2,78E-04	99	270
0,4	0,8	1,21E+09	0,0088	2,69E-04	102	278
0,5	0,2	1,92E+09	0,0078	1,89E-04	114	312
0,5	0,4	2,08E+09	0,0075	1,82E-04	118	323
0,5	0,6	2,22E+09	0,0073	1,75E-04	122	333
0,5	0,8	2,37E+09	0,0070	1,69E-04	125	343
0,6	0,4	3,60E+09	0,0062	1,24E-04	139	382
0,6	0,8	4,10E+09	0,0059	1,15E-04	148	405
0,7	0,4	5,72E+09	0,0053	8,92E-05	160	437
0,7	0,8	6,52E+09	0,0050	8,27E-05	169	462
0,8	0,4	8,55E+09	0,0047	6,68E-05	178	489
0,8	0,8	9,74E+09	0,0044	6,18E-05	188	515
<b>Dak of vloer, lengte 5,1 m</b>						
0,3	0,2	1,02E+08	0,0331	1,38E-03	28	76
0,3	0,4	1,10E+08	0,0318	1,33E-03	29	79
0,3	0,6	1,18E+08	0,0308	1,29E-03	30	81
0,3	0,8	1,25E+08	0,0299	1,25E-03	31	84
0,4	0,2	2,43E+08	0,0248	7,76E-04	37	101
0,4	0,4	2,63E+08	0,0238	7,46E-04	38	105
0,4	0,6	2,80E+08	0,0230	7,21E-04	40	109
0,4	0,8	2,98E+08	0,0223	6,99E-04	41	112
0,5	0,2	4,75E+08	0,0198	4,95E-04	46	126
0,5	0,4	5,14E+08	0,0190	4,76E-04	48	131
0,5	0,6	5,49E+08	0,0184	4,60E-04	50	136
0,5	0,8	5,85E+08	0,0178	4,46E-04	51	140
0,6	0,4	8,89E+08	0,0158	3,29E-04	57	157
0,6	0,8	1,01E+09	0,0149	3,08E-04	61	168
0,7	0,4	1,41E+09	0,0136	2,41E-04	67	183
0,7	0,8	1,61E+09	0,0127	2,26E-04	71	195
0,8	0,4	2,11E+09	0,0119	1,84E-04	76	209
0,8	0,8	2,41E+09	0,0111	1,72E-04	81	222

## 4 Bekleding wanden rondom kogelvanger 300 m tunnel

Granaatscherven van detonerende granaten zullen in elk materiaal schade aanrichten, dat wil zeggen fragmentgaten of kraters slaan. Schade is dus niet te voorkomen, maar wel kan een constructie gekozen worden waarbij de onderhoudskosten laag blijven. Daarvoor zijn diverse mogelijkheden.

Eén mogelijkheid is om de betonwanden kaal te houden en een extra dikke dekkingslaag toe te passen. De scherven vreten langzaam deze laag weg en na verloop van tijd wordt een nieuwe laag (vezel)beton opgespoten. Hier heeft TNO Prins Maurits Laboratorium (TNO-PML) niet zo goede ervaringen mee. Ten eerste levert elke detonatie een hoeveelheid puin op, wat het schoonhouden van de tunnel bemoeilijkt. Ten tweede is de erosie heel onregelmatig. Op de ene positie zal het beton nog onbeschadigd zijn, terwijl op de andere de wapening al beschadigd is. Het risico op beschadiging van de wapening is het ergste, aangezien dat slechts tegen hoge kosten is te herstellen.

In de meeste testbunkers is er daarom voor gekozen om de wanden te bekleden. Staal is hiervoor de meest kosteneffectieve oplossing. De staalplaten kunnen vervangen worden als ze te ver beschadigd zijn. Dit werkt goed, de bekleding gaat vele jaren mee. Uit onze gegevens over projectielen weten wij dat een fragment van een 40 mm projectiel gemiddeld ongeveer 4 mm in staal penetreert, en maximaal ongeveer 8 mm. Een staalplaat van 15 of 20 mm zal dus meerdere inslagen op (bijna) dezelfde positie kunnen weerstaan voordat de plaat vervangen moet worden. Hoe dikker, hoe langer de plaat meegaat.

Wel was altijd een probleem dat de bouten waarmee de platen bevestigd zijn zich loswerkten of zelfs braken. Bij de bouw van TNO-PML's schietbunker is daarvoor een oplossing gevonden. De oorzaak van het loswerken en de berekening van de oplossing zijn beschreven door Harmanny e.a. [1986], Mercx, Hulsbergen [1992] en het bouwbestek [ABT, 1985]. Hier wordt alleen de oplossing gegeven.

Figuur 4.1 toont de oplossing. De bekledingsplaat is gewalst staalplaat van 20 mm dik, met afmetingen van 830 x 1000 mm. Tussen de betonwand en de staalplaat wordt een laag hout met hoge elasticiteitsmodulus geplaatst (watervast verlijmd multiplex van Fins berken, 7 laags, dikte 25 mm, behandeld met brandvertragend middel). Dit voorkomt verpulvering van het beton achter een inslag. Bij een detonatie zal de schokgolf de staalplaat en multiplexplaat iets indrukken. Daarna veert dat pakket weer terug, wat bij conventionele bevestiging een grote belasting op de bouten opleverde. Daarom is een lange, veerkrachtige bout toegepast (vijf M16 10,9 bouten per plaat, vier in de hoeken en één in het midden). De bout is 0,75 m lang en in het beton verankerd. De bout is omhuld met een PVC buis om hechting van het beton aan de bout te voorkomen. Voor extra veerkracht zijn nog twee schotelveren onder de boutkop geplaatst. De hele bekleding is vóór het storten van het beton aangebracht, als een soort verloren bekisting, zie figuur 4.2. Na het uitharden van het beton zijn de bouten op een voerspanning van 5 kN gebracht, waarbij ongeveer de 15% van de veerlengte van de schotelveren benut werd.

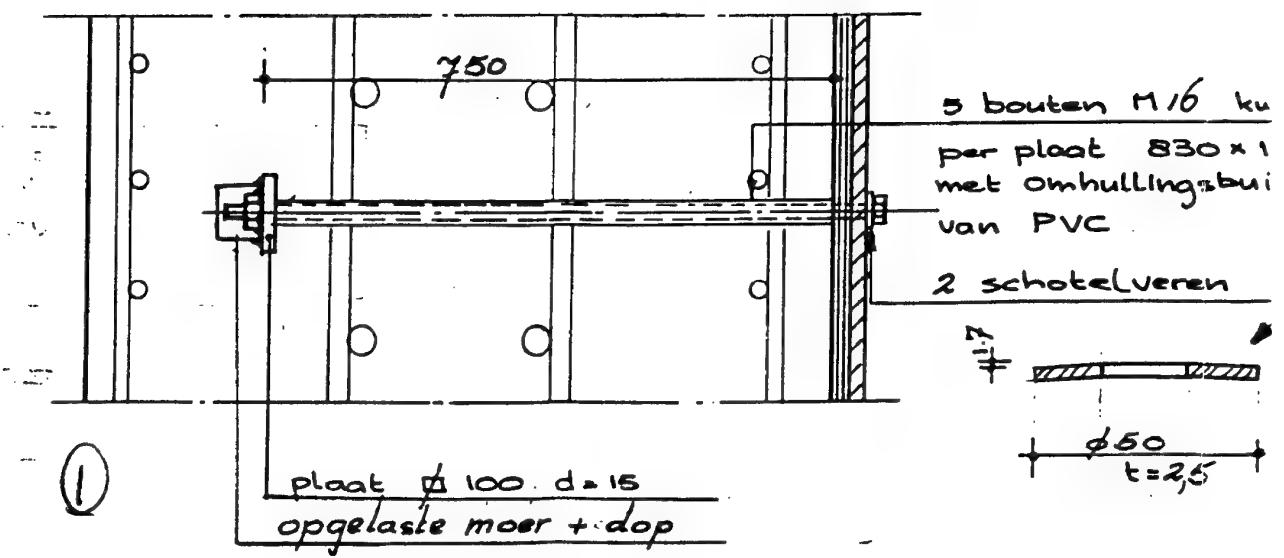
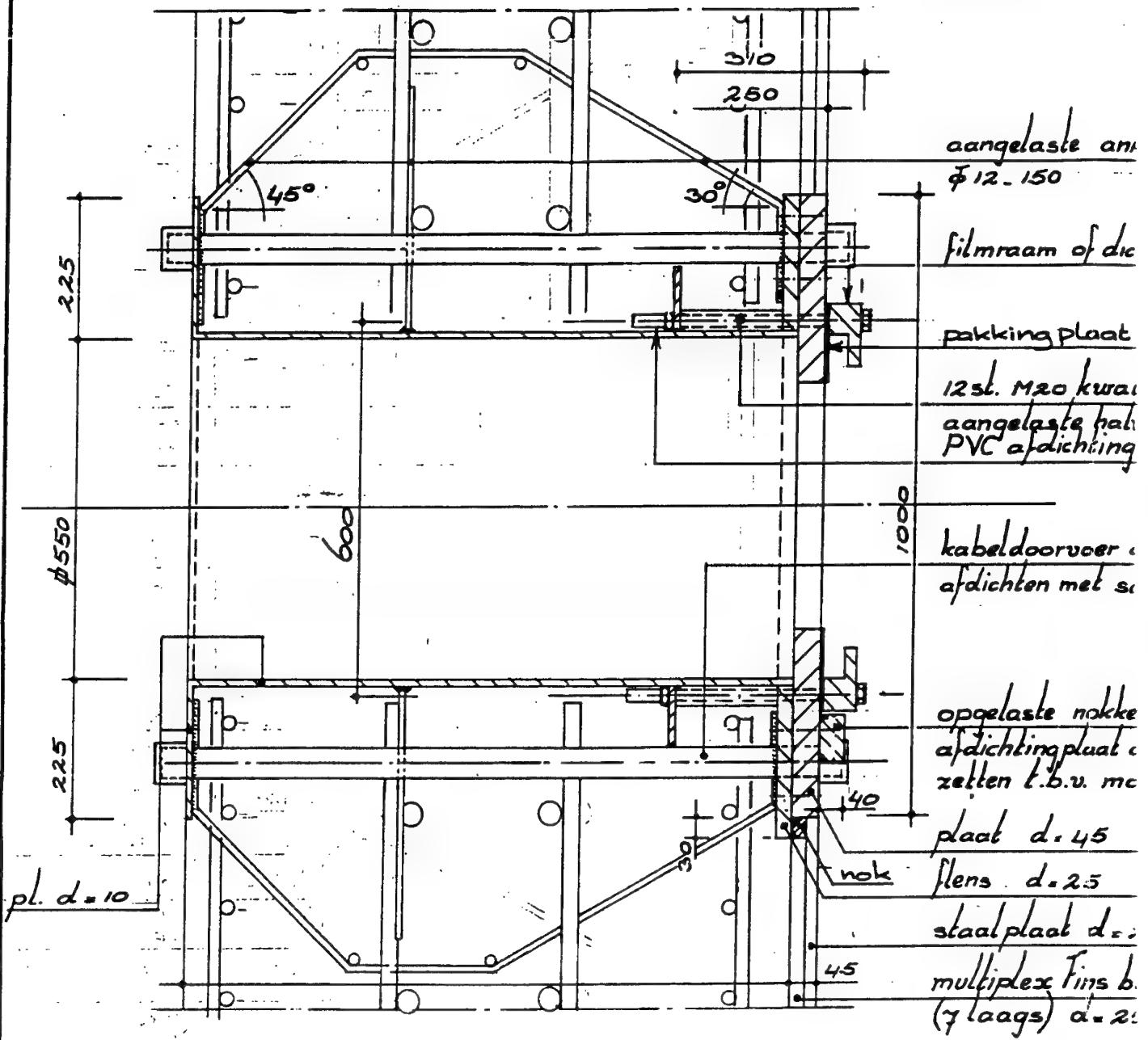
In de 300 m schiettunnel zijn de belastingen lager dan in TNO-PML's schietbunker, maar minder goed gedefinieerd. Als ontworpen wordt op een afzwaaijer die op 0,5 m afstand van de wand detoneert is de piekdruk niet veel lager dan in TNO-PML's schietbunker. In dat geval is een M16 8,8 bout van 500 mm lengte nodig. De piekdruk zakt echter snel naarmate de detonatie verder van de wand plaatsvindt. Op 1 m afstand is geen extra boutlengte meer nodig. Het lijkt dus aantrekkelijk om korte bouten toe te passen en te accepteren dat bij een afzwaaijer een paar gebroken bouten vervangen moeten worden.

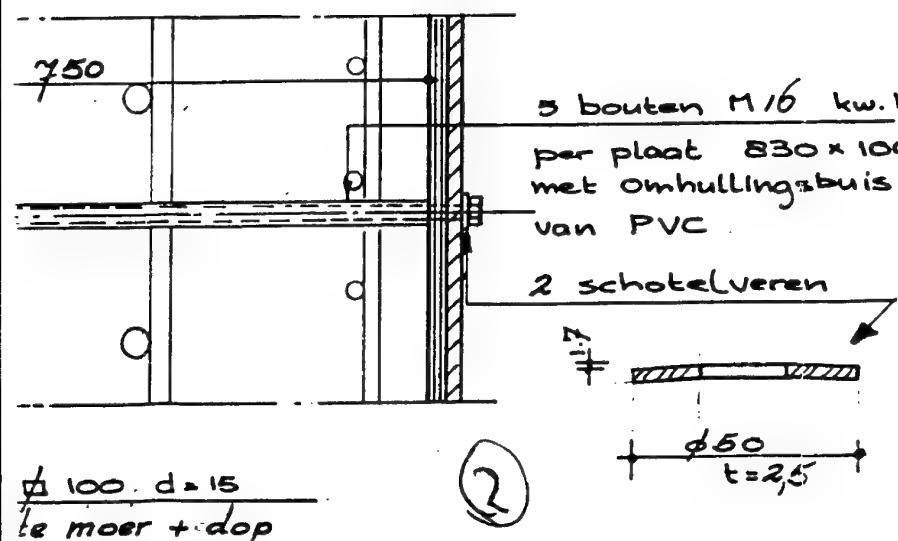
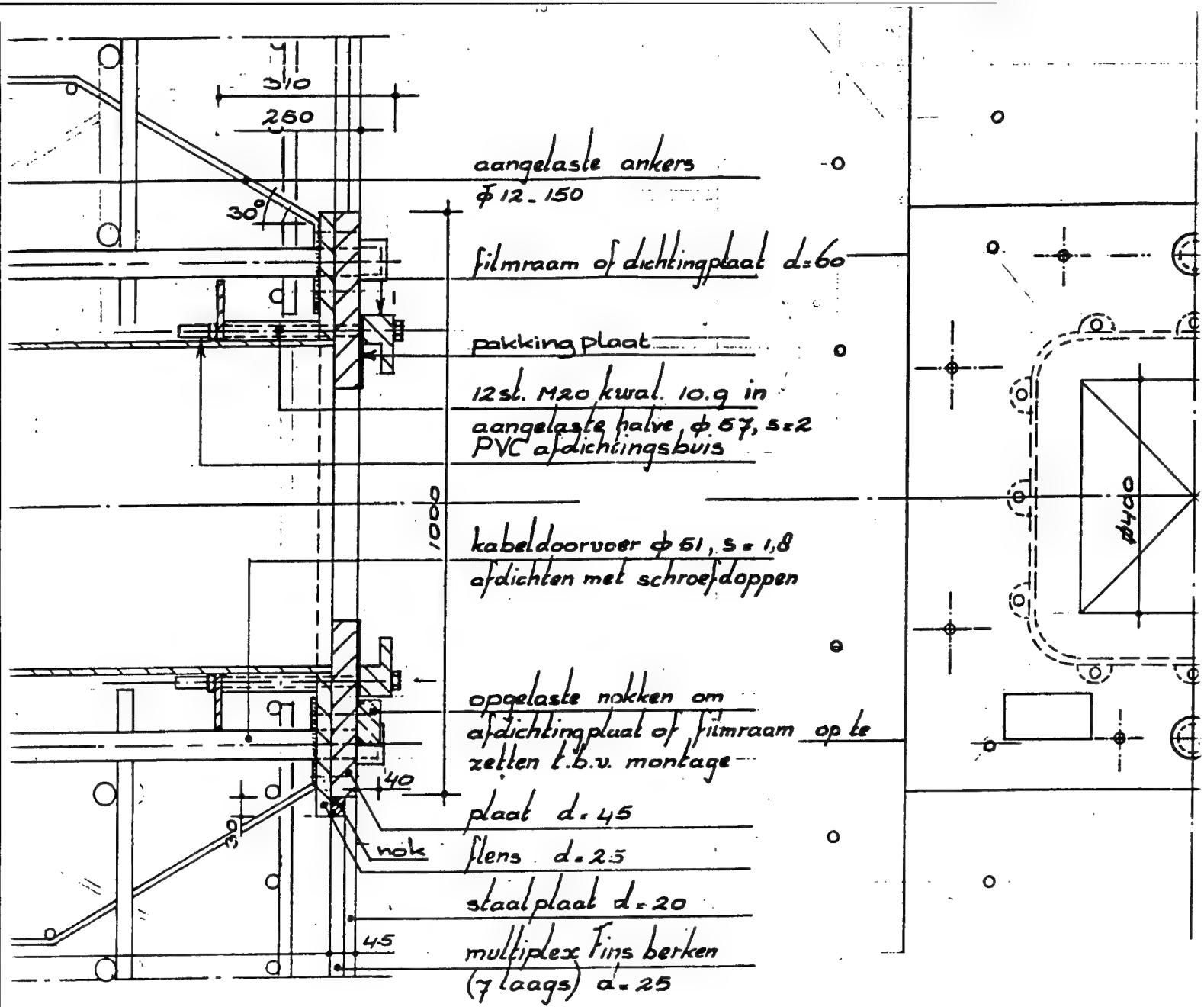
Daarom wordt de volgende wandbekleding aanbevolen:

- staalplaten van 15 of 20 mm dikte, van vrij te kiezen afmetingen (echter wel opgebouwd uit losse platen);
- watervast verlijmd multiplex van Fins berken, behandeld met brandvertragend middel, dikte 10 tot 25 mm;
- vastgezet met circa 6 bouten per m<sup>2</sup>, (korte M16 8,8 boutingen, met twee schotelveren, voorgespannen tot 5 kN, oftewel 15% van de veerlengte van de schotelveren).

Voor de vloer worden vervangbare betonplaten (Stelconplaten) aanbevolen.

De bekleding dient zich tot 5 à 8 m vóór en achter het detonatiepunt uit te strekken. Natuurlijk geldt hoe verder, hoe minder erosie van de betonwanden.





## VERTRUWELIJK

Figuur 4.1: Bevestiging

omschrijving van de wijzigingen

werk

Schiettunnel  
filmpoort + bevestiging

onderwerp

schaal

werkkode

1:10

LPMA

adviesbureau  
voor  
bouwtechniek bv

Arnhemsestraatweg 358  
6881 NK Velp  
Postbus 82  
6800 AB Arnhem

Tele:  
(0031)  
Tele:

ankers

dichtingstaat d=60

aat

kwal. 10.9 in  
halve,  $\phi 57$ , s=2  
ringbus

oer  $\phi 51$ , s = 1,8  
et schroefdoppen

okken om  
aat of filmraam op te  
montage

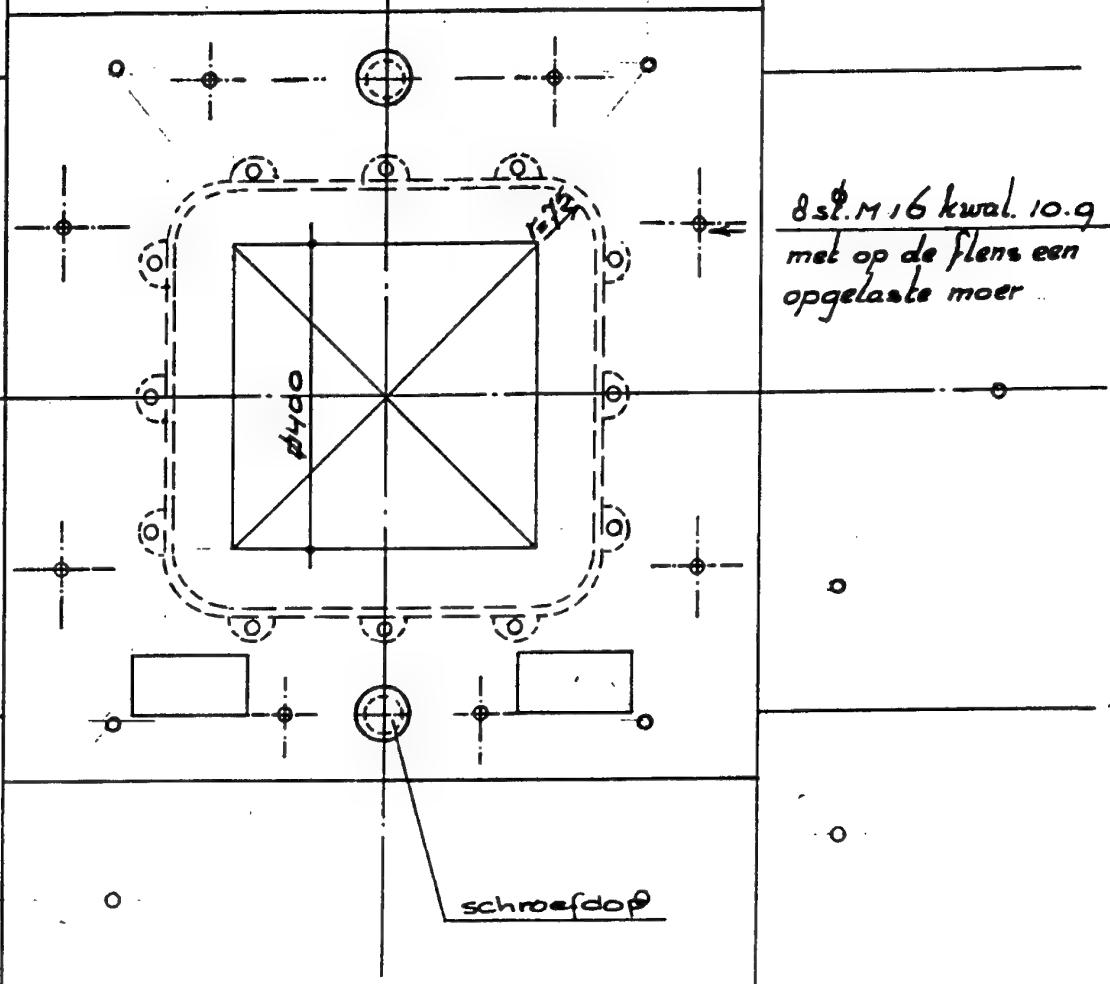
15

5

d = 20

ns berken

z = 25



VERTRUWELIJK

Figuur 4.1: Bevestiging van de bekledingsplaat aan de tunnelwand [ABT, 12/12/85].

LDW - 12-12-85

kw. 10.9

0 x 1000

buis

omschrijving van de wijzigingen		getek	gekontrolleerd	wijz	datum
werk	Schieltunnel				
onderwerp	filmpoort + bevestiging bekl. plaat				
schaal	werkcode	tekeningnummer			formaat
1:10	LPMA	011	(3)		A3

adviesbureau  
voor  
bouwtechniek bv

Arnhemsestraatweg 358  
6881 NK Velp  
Postbus 82  
6800 AB Arnhem  
Telefoon 085-683111  
(doorkiesnummer)  
Telex 45837 labt nl  
ABT-West  
Mijnbouwstraat 106  
2628 RX Delft  
Telefoon 015-621661

**abt**



Figuur 4.2: Wapening van TNO-PML's schietbunker. De grijze 'stekels' zijn de bevestigingsbouten van de wandbekleding. De multiplex binnenlaag van de bekleding is nog vaag te zien achter de wapening (880802-5).

## 5 Maatregelen tegen een onverwacht exploderende vuurbuis

Het komt zo nu en dan voor dat een schietbuis ontploft. Bij sommige proeven is een grote kans op ontploffing van de schietbuis, voor deze worden dan ook speciale maatregelen getroffen. In andere gevallen is het een onverwachte explosie. Voor een interne risicoanalyse van TNO-PML werd geschat dat de kans op zo'n onverwachte explosie 0,02 per jaar was. De effecten van een ontploffing van een schietbuis zijn blast en fragmenten van de schietbuis. Deze effecten komen gedeeltelijk vrij in de schiettunnel en gedeeltelijk in de bedieningsruimte, 104 of 101. Geschat wordt dat de blast vergelijkbaar is met de mondingsblast en dat de fragmenten van de schietbuis ongeveer 10 kg zwaar kunnen zijn en met 70 m/s weggeworpen kunnen worden. De fragmenten zullen vrijwel uitsluitend in zijwaartse richting geworpen worden. Om dergelijke fragmenten te stoppen is een betonnen muur van 30 cm dikte nodig.

Door de opdrachtgever wordt geaccepteerd dat personeel in de bedieningsruimte een grote kans op zwaar letsel of overlijden heeft. Personeel buiten de bedieningsruimte (met name in de meetruimte) mag echter geen extra risico lopen.

Tussen de bedieningsruimte van de 300 m tunnel en de meetruimte is een 30 cm betonnen muur voorzien waarin zich slechts kleine kijkgaten bevinden. De kijkgaten zijn afgedicht met polycarbonaat beglazing. Door de positie van de kijkgaten ten opzichte van de vuurbuis is het zeer onwaarschijnlijk dat personeel in de meetruimte getroffen wordt door fragmenten. Verder garanderen de kleine afmetingen en het sterke materiaal dat de blastbestendigheid in orde is. De deur naar de gang moet fragmentwerend worden uitgevoerd. De kans dat fragmenten naar achteren geworpen worden is verwaarloosbaar. Daarom hoeft de roldeur niet fragmentwerend uitgevoerd te worden. Een ander argument om de roldeur niet fragmentwerend uit te voeren is dat het risico voor personen buiten voornamelijk bepaald wordt door de aangrenzende munitietechnische ruimten.

Tussen de bedieningsruimte van de 50 m tunnel en de meetruimte is een wand met beglazing voorzien. Deze wand hoeft niet per se fragmentwerend uitgevoerd te worden, aangezien de kans dat fragmenten naar achteren geworpen worden heel klein is. Wel moeten alle wanden van de bedieningsruimte blastbestendig uitgevoerd worden. Ook de deur naar de gang moet blastbestendig worden uitgevoerd. De belasting op de wanden is bepaald met de methoden uit TM 5-1300 [1990]. Dit levert een piekdruk van 765 kPa en een impuls van 660 Pa.s. De hoeveelheid explosief is echter wat te laag om een goede berekening met de methoden uit TM 5-1300 [1990] uit te kunnen voeren. De waarden zullen daarom een ruime overschatting zijn.

Een heel andere maatregel om het gevaar van een exploderende schietbuis te reduceren is eenvoudig om de schietbuis zo ver mogelijk door de opening naar de schiettunnel te steken.

## 6 Conclusies

Ten behoeve van de nieuwbouw van DMKL/AB te Oldebroek zijn de belastingen op de schiettunnels bepaald. Het bleek dat de grootste bijdrage aan de belasting door de mondingsblast geleverd wordt. Deze korte drukpuls is vrijwel constant over de lengte van de tunnel. Voor de tunnelwanden is de statische belasting bepaald die dezelfde uitbuiging zou geven.

Apparatuur die in de tunnel wordt geplaatst of aan de tunnelwanden wordt bevestigd kan overigens op andere ontwerpdrukken ontworpen moeten worden dan de wanden. Dit komt door de vertaling van een dynamische belasting naar een equivalente statische belasting. Een ontwerpwaarde van 200 kPa zal meestal voldoende zijn voor de mondingsblast. De versnelling van de wand door de mondingblast is maximaal  $500 \text{ m/s}^2$ .

De ruimte rondom de kogelvanger van de 300 m tunnel wordt belast door de effecten van detonerende granaten (blast en fragmenten). Tegen de fragmenten wordt een bekleding van de wanden met staalplaat voorgesteld. Als laatste punt zijn maatregelen voorgesteld tegen de effecten van een onverwacht exploderende vuurbuis.

## 7 Referenties

ABT,  
Ontwerp schietfaciliteit TNO-PML,  
Adviesbureau voor Bouwtechniek, LPMA-4038, Velp, december 1985.

ABT,  
Schiettunnel. Filmpoort + bevestiging bekl. plaat,  
Adviesbureau voor Bouwtechniek, tekening LPMA-011, Velp, 12 december 1985.

Beeks, A.A.F.M.; Brackenhoff, H.E.A. en Rebel, M.,  
Geluidonderzoek LuASK Botgat te Callantsoog. Deelrapport I: Schietgeluid,  
Technisch Physische Dienst TNO-TPD TU Delft, TPD-HAG-RPT-940041, Delft,  
maart 1994.

Beeks, A.A.F.M.,  
Resultaten van metingen op Schietkamp Botgat, fase 3, oktober 1994,  
(persoonlijke communicatie).

Berg, A.C. van den,  
BLAST - A code for numerical simulation of multi-dimensional blast effects,  
TNO Prins Maurits Laboratory, internal report.

Bofors,  
Pressure curve,  
Bofors, drawing 3053061, 1983.

Boris, J.P.,  
Flux-Corrected Transport modules for solving generalized continuity equations,  
NRL Memorandum report 3237, Naval Research Laboratory, Washington, D.C.,  
1976.

Doormaal, J.C.A.M. van,  
Explosieveiligheid van het ontwerp van de nieuwbouw van DMKL/AB te Oldebroek,  
TNO Prins Maurits Laboratorium, bijlage bij brief, Rijswijk, in voorbereiding.

Harmann, A. en anderen,  
Design of a closed test facility for terminal ballistics,  
22<sup>nd</sup> Explosives Safety Seminar, Anaheim, Cal., August 1986.

Hulsbergen, J.G.,  
Laboratorium voor ballistisch onderzoek, Ypenburg,  
Conceptversie van artikel voor Cement, mei 1995.

Klingenbergs, G.,  
Gun muzzle blast and flash,  
Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 14,(1989), pp. 57-68.

Kodde, H.H.,  
Blast- en geluidmetingen nabij 40L70 en PRTL luchtafweergeschut te Grote  
Keeten (Botgat), TNO Prins Maurits Laboratorium, bijlage bij brief nr. 93  
D2/1673, september 1993.

McDonald, B.E. en Kuperman, W.A.,  
Time domain formulation for pulse propagation including nonlinear behaviour at a  
caustic,  
J. Acoust. Soc. Am. **81**, 1406-1417, 1987.

Mercx, W.P.M.,  
Design considerations for blast containment structures.

Montanaro, P.E. en Swisdak, M.M. Jr.,  
INBLAST - A new and revised computer code for the prediction of blast inside  
closed or vented structures,  
24<sup>th</sup> DoD Explosives Safety Seminar, St. Louis, August 1990.

NEN 6720,  
Technische grondslagen voor bouwconstructies TGB 1990 - Voorschriften beton,  
Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1990),  
NNI, NEN 6720, Delft, 1991.

Pierce, A.D.,  
Acoustics, AIP, New York, 1991, Chapter 11.

Smolii, N.I., et al.,  
Air shock waves from detonating cord explosions,  
Soviet Mining Science, Vol. 21, no. 2, pp. 146-150, 1985.

TM 5-1300,  
Structures to resist the effects of accidental explosions,  
Departments of the Army, the Navy, and the Air Force, TM 5-1300,  
NAVFAC P-397, AFR 88-22, Washington, D.C., November 1990.

TM 5-855-1,  
Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons,  
Department of the Army Technical Manual TM 5-855-1, Washington, D.C., 1985.

Whitham, G.B.,  
Linear and nonlinear waves,  
Wiley & Sons, New York, 1974.

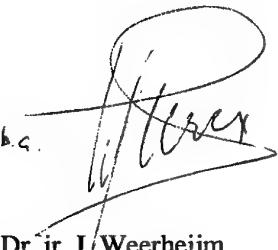
## 8 Ondertekening

b.a. 

Ir. A.C. van den Berg  
Auteur

b.a. 

Dr. E.M. Salomons (TNO-TPD-TU Delft)  
Auteur

b.a. 

Dr. ir. J. Weerheim  
Groepshoofd



Ir. R.M.M. van Wees  
Projectleider/Auteur

---

## Bijlage A      Berekening van de mondingsblastbelasting

### A.1      Inleiding

De knallen die ontstaan bij het afvuren van wapens in de tunnel leveren een blastbelasting op de tunnelwanden op. Het is bekend dat de drukken van mondingsblasttientallen kPa kunnen bedragen, wat bepalend zou kunnen zijn voor de dimensionering van de wanden. Daarom dient de mondingsblast die optreedt in de tunnel geschat te worden. Een probleem hierbij is dat niet bekend is welke wapens in de toekomst gebruikt gaan worden. Volgens het programma van eisen moet uitgegaan worden van een wapen met een kaliber van 40 mm, een kruitlading van 750 g en een mondingsnelheid van 1800 m/s. Dit is een (nog) niet bestaand wapen. Een ander probleem is de sterke richtingsafhankelijkheid van mondingsblast. Dit maakt dat de gereflecteerde druk op de wand moeilijk te voorspellen, zelfs al zou de mondingsblast in het vrije veld bekend zijn.

Vanwege deze moeilijkheden is gekozen voor numerieke simulatie van de mondingsblast. Hiermee kan de belasting op de tunnelwand berekend worden. De invoergegevens worden gekalibreerd aan de hand een vrije veld berekening van de mondingsblast van een 40L70-wapen. Hiervan zijn namelijk ook meetresultaten beschikbaar, van metingen die TNO (TPD en PML) in 1993 gedaan heeft [Kodde, 1993], [Beek e.a., 1993].

### A.2      Methode

Een blastgolf kan worden omschreven als een golf van statische overdruk die vergezeld gaat van een golf van mediumsnelheid (een windvlaag). Bij de voortplanting en uitsterven van een blastgolf in de ruimte en bij eventuele reflectie op vaste wanden zijn viskeuze stromingseffecten van ondergeschikt belang. De Euler-vergelijkingen, die compressibele, wrijvingsloze stroming beschrijven, vormen daarom een passend model voor simulatie van deze blasteffecten.

BLAST [Van den Berg] is de TNO-software voor oplossing van de multidimensionale Euler-vergelijkingen door middel van een Flux-Corrected Transport (FCT) eindige differentieschema [Boris, 1976]. De FCT-techniek maakt een optimaal gebruik van zowel een eerste orde schema voor numerieke stabiliteit als een hogere orde schema voor een adequate representatie van discontinuïteiten zoals schokverschijnselen [Boris, 1976]. Vanuit een bepaalde begintoestand (een initiële verdeling van de gasdynamische parameters), kan de hieruit resulterende gasdynamica worden berekend door een tijdstapsgewijze oplossing van de Euler-vergelijkingen.

Om in het onderhavige geval de omvang van het numerieke probleem binnen hanteerbare proporties te houden, is aanname van cilindersymmetrie een noodzaak. De loop van een wapen wordt in het rooster is gedefinieerd door middel van een cilinderwand rondom de symmetrie-as. Door het medium binnen de cilinder te specificeren met parameters die karakteristiek zijn voor de gasdynamische toestand van het gas in een loop bij het uittreden van een projectiel, kan de mondingsblast van een wapen worden gesimuleerd. Hierbij wordt aangenomen dat het drijvende gasmengsel zich gedraagt als een ideaal gas. Naverbrandingseffecten worden hierbij uitgesloten.

### A.3 Kalibratie

Karakteristieke waarden voor de gasdynamische toestandsparameters voor een gasmengsel in de loop van wapens van verschillend kaliber zoals de temperatuur en snelheid zijn ontleend aan Klingenberg [1989]. De derde parameter, de statische druk in de loop werd bepaald door kalibratie (door ‘trial and error’) aan de hand van experimentele gegevens [Kodde, 1993]. Deze set van gegevens bestaat uit een aantal druktijdsignalen, gemeten op korte afstand van de mond van 40L70-luchtafweergeschut afgevuurd met een kruitlading van 470 g. In bijlage D wordt bekeken of de gevonden oplossing ook goede antwoorden levert op grotere afstanden van de vuurmond.

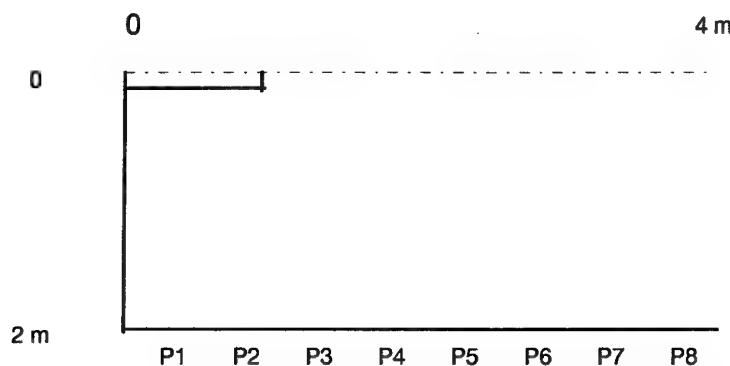
Een celgrootte van  $1 \text{ cm}^2$  bleek voldoende voor een goede numerieke resolutie van de blastgolven. De beschikbare rekencapaciteit noopte tot beperking van de afmetingen van het numerieke rooster. Hierdoor waren alleen de meetsignalen van een tweetal meest nabijgelegen punten bruikbaar.

Initialisering van de gasdynamische toestand binnen de loop van het wapen met een gastemperatuur van 1650 K, een gassnelheid van 1040 m/s en een statische overdruk van 18 MPa gaf de meest bevredigende reproductie van de experimentele meetsignalen, in termen van zowel de piekoverdruk als de positieve faseduur. De overdruk is veel lager dan de experimenteel gemeten kamerdruk op het moment dat het projectiel de loop verlaat, van 75 MPa [Bofors, 1983]. Het verschil komt door de dynamische druk. In de kamer stroomt het gas niet, bij de monding wel, wat een drukverschil geeft van ongeveer 55 MPa.

De belasting van de tunnelwand moet echter berekend worden voor de mondingsblast van een hypothetisch wapen van hetzelfde kaliber als de 40L70 maar met een kruitlading van 750 g. Uit metingen aan 155 mm geschut is bekend dat zowel de mondingsnelheid als de einddruk min of meer lineair toenemen met het gewicht van de kruitlading. Daarom werden de initiële snelheid en overdruk voor de kruitlading van 750 g geschat op 1925 m/s en 31,6 MPa. De bijbehorende temperatuur is 1650 K. De mondingsnelheid is wat hoger dan de gespecificeerde 1800 m/s, maar ter wille van de consistentie is toch uitgegaan van 1925 m/s.

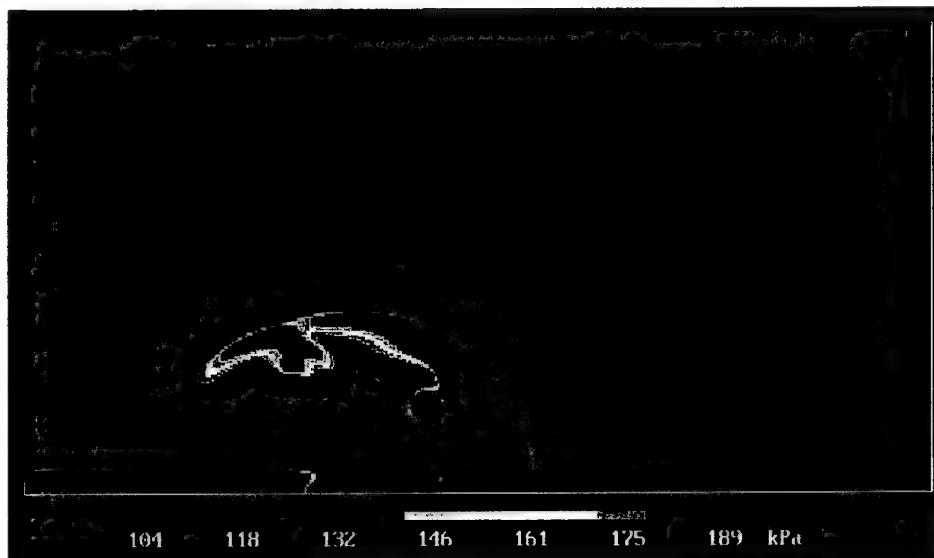
#### A.4 Berekeningsresultaten

Teneinde het probleem binnen numeriek hanteerbare proporties te houden, is cilindersymmetrie aangenomen. Daartoe is de loop van het wapen in de symmetriesas van het domein geplaatst en is de geometrie van de tunnel vereenvoudigd tot een cilinder met een inwendige diameter van 4 m. Figuur A.1 toont het berekeningsdomein bestaande uit een cilindervormige ruimte met een straal van 2 m en een lengte van 4 m.



*Figuur A.1: Domein voor de berekening van de belasting van de tunnelwand.*

De monding van het wapen is 1 m vanaf de achterwand geplaatst. De initiële toestand in de loop werd gespecificeerd met de hierboven genoemde waarden.



tijdstip 1,22 ms



tijdstip 2,00 ms

*Figuur A.2: Ontwikkeling van de mondingsblast in de schiettunnel op de tijdstappen 1,22; 2,00; 2,75; 3,50; 4,23 en 6,15 ms.*  
De kleuren geven de waarde van de absolute druk aan. Waar isobaren zich ophopen is sprake van schokverschijnselen. Duidelijk is te zien dat de druk vóór de monding veel hoger is dan er achter. Ook is de schoekgolf opvallend kort: minder dan 1 m lang. De laatste figuur toont het reflecteren van de schoekgolf tegen de wand van de tunnel.



tijdstip 2,75 ms



tijdstip 3,50 ms

*Figuur A.2: (vervolg).*



tijdstip 4,23 ms

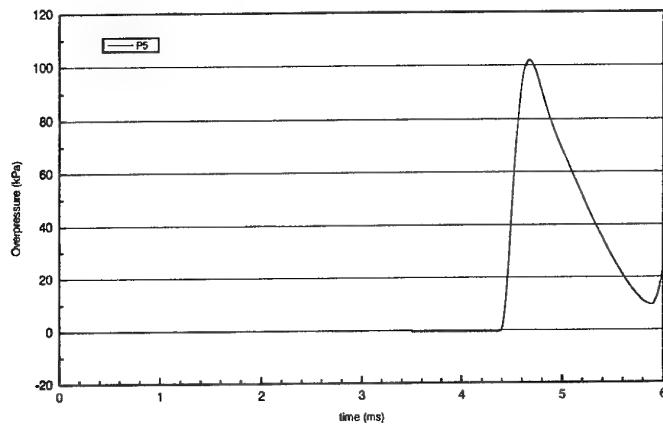


tijdstip 6,15 ms

Figuur A.2: (vervolg).

Figuur A.2 toont in een serie van 6 opeenvolgende momentopnamen hoe de gasdynamica van de mondingsblast zich in de tijd ontwikkelt. Duidelijk is te zien hoe de blastgolf zich door expansie in de ruimte verdunt en reflecteert tegen de tunnelwand.

Gedurende de simulatie is in een achttal plaatsen aan de tunnelwand de druk als functie van de tijd opgenomen. De posities van deze punten zijn aangegeven in figuur A.1 en gespecificeerd in tabel A.1. Een karakteristiek druktijdsignaal, opgenomen in positie 5 is weergegeven in figuur A.3.



*Figuur A.3: Druktijdsignaal opgenomen in positie 5 (op de wand, 1,5 m voor de monding van de loop) tijdens simulatie van de mondingsblast van een hypothetisch wapen in de schiettunnel. De piekdruk is 100 kPa, de impuls 75 Pa.s.*

De maximale overdrukken, berekend in elke positie, zijn opgenomen in tabel A.1. Zoals verwacht is de piekoverdruk van de blast op de tunnelwand achter de vuurmond het laagst. Naar voren neemt de piekoverdruk toe tot meer dan 100 kPa. Omdat de tunneldoorsnede constant is, zal de blastgolf tijdens voortplanting naar het andere einde van de tunnel betrekkelijk weinig in sterkte afnemen.

*Tabel A.1: Berekende piekoverdruk aan de wand van de schiettunnel, druk 31,6 MPa; temperatuur 1650 K; snelheid 1925 m/s.*

Drukopnemer	Positie x (m)	Positie y (m)	Max. overdruk (kPa)
P1	0,5	2	40
P2	1,0	2	57
P3	1,5	2	83
P4	2,0	2	96
P5	2,5	2	102
P6	3,0	2	100
P7	3,5	2	97
P8	4,0	2	117

## Bijlage B      Berekening van de overige belastingen

### B.1      Afmetingen van de 50 m tunnel

101A, meettunnel 50 m

lengte: 50 m;

breedte: 5,10 m;

hoogte: 3,20 m.

Verder 1 nis: 4,40 x 1,80 x 3,20 m.

De kogelvanger heeft een nog niet bekend vrij volume. Dit volume wordt geschat op 82 m<sup>3</sup>.

Dit levert een totaal volume van 923 m<sup>3</sup>.

101, bedieningsruimte

lengte: 4,50 m;

breedte: 5,70 m;

hoogte: 3,20 m;

Dit levert een totaal volume van circa 80 m<sup>3</sup>.

Afmetingen schietgat: maximaal 1,00 x 0,40 m, maar kan modulair afgesloten worden.

Gronddekking tot een peil van 4,0 m, dat wil zeggen circa 0,5 m gronddekking.

### B.2      Afmetingen van de 300 m tunnel

104A, meettunnel 300 m

lengte: 300 m;

breedte: 5,10 m;

hoogte: 3,20 m.

Verder 4 nissen: 4,50 x 2,05 x 3,20 m; 2 maal 2 x 3 x 3,20 m; 6,7 x 2,5 x 3,2 m.

De kogelvanger heeft een nog niet bekend vrij volume. Dit volume wordt geschat op 82 m<sup>3</sup>.

Dit levert een totaal volume van 5100 m<sup>3</sup>.

104, bedieningsruimte  
lengte: 10,69 m;  
breedte: 6,40 m;  
hoogte: 4,20 m.

Dit levert een totaal volume van 287 m<sup>3</sup>.

Afmetingen schietgat: twee gaten van circa 1 m<sup>2</sup>, kunnen modulair afgesloten worden.

Gronddekking tot een peil van 4,0 m, dat wil zeggen circa 0,5 m gronddekking.

### B.3 Quasi-statische druk

#### B.3.1 Inleiding

Bij het vuren komen de kruitdampen vrij in de tunnel, een afgesloten ruimte. Verder zullen de kruitdampen naverbranden met de lucht uit de tunnel. Dit levert een drukverhoging in de tunnel op. De dampen ontsnappen later via het ventilatiesysteem of via lekken, dit kan afhankelijk van de grootte van de openingen meerdere seconden duren. Vandaar dat deze druk de quasi-statische druk (QSP) wordt genoemd. De QSP is recht evenredig met de hoeveelheid kruit en explosieven die verbranden, zodat een salvo van 250 patronen met 50 gram kruitlading de hoogste QSP levert.

N.B.: de mondingsknal van de laatste patroon zal vrijkommen in een tunnel waar al QSP heerst. De belasting voor de tunnelwand is dus een combinatie van de QSP en mondingsknal.

De QSP in de tunnel door het vrijkommen van de kruitdampen is berekend met het programma INBLAST [Montanaro en Swisdak, 1990]. Dit programma neemt de werkelijke verbrandingsenergie van kruit in rekening, met of zonder naverbranding. Het brengt niet automatisch in rekening dat een deel van de energie van het kruit gebruikt wordt om het projectiel voor te stuwen, maar dit is handmatig in rekening gebracht. Er is uitgegaan van nitrocellulose kruit. Aangenomen is dat alle kruitdampen volledig naverbranden, de meest ongunstige situatie. Verwacht wordt dat in werkelijkheid slechts een gedeelte van de kruitdampen zal naverbranden, zodat dit een veiligheidsmarge oplevert.

Als er een opening naar de buitenlucht in de tunnel zit (eventueel via een geluidsdemper en/of stoffilter) zal de QSP naar buiten ontlust worden. Bij een voldoende grote opening zal de QSP laag blijven. De maximale druk die in dat geval bereikt wordt, wordt de gereduceerde druk genoemd. INBLAST kan ook dit soort ventberekeningen aan. In dit geval wordt de hoogste gereduceerde druk geproduceerd

door een salvo met de hoogste massastroom, dus een salvo van 10 patronen met 750 gram kruitlading (7,5 kg, vershoten in 1,2 s, dus 6,25 kg/s).

### B.3.2 Resultaten

De berekende QSP in de 50 m tunnel, 101A, is 38 kPa voor een salvo van 250 patronen met 50 gram kruitlading. De bedieningsruimte, 101, zal ook vol met kruitdampen stromen en onder druk komen te staan. Bij een opening in de tussenwand van slechts 10 bij 10 cm is de QSP in de tunnel en bedieningsruimte namelijk al binnen twee seconden vereffend.

Als er een ontlastopening in de tunnel zit wordt de druk lager. De gereduceerde drukken voor ontlastopeningen van diverse diameters staan in tabel B.3.1. Indien een opening met een geluidsdemper en/of stoffilter gebruikt wordt moet de stromingsweerstand van die appendages vertaald worden naar een gat van een bepaalde diameter.

*Tabel B.3.1: Gereduceerde drukken in de 50 m tunnel, bij ontlastopeningen van diverse diameter.*

Gatdiameter [m]	Overdruk salvo 250 x 50 g [kPa]	Overdruk salvo 10 x 750 g [kPa]
0,0	38	24
0,5	5,0	19
1,0	0,4	9,1

Dezelfde berekeningen leveren voor de 300 m tunnel, 104A, een QSP van 11 kPa op voor een salvo van 250 patronen met 50 gram kruitlading en 15 gram springladings. Er komt dan 430 m<sup>3</sup> (normaal m<sup>3</sup>) kruitdamp vrij.

Voor het salvo van 10 patronen met 750 gram kruitlading en 150 gram springladings is de berekende QSP 6,1 kPa. Hier is de tijd waarin de druk vrijkomt echter zo kort (in verhouding tot de lengte van de tunnel) dat niet meer aangenomen mag worden dat de druk gelijkmatig over de tunnel verdeeld wordt. De drukverhoging die door golfverschijnselen veroorzaakt wordt is niet op een eenvoudige manier met zekerheid te bepalen. Aangenomen mag worden dat de druk niet boven de 12 kPa uitkomt. Ondanks de golfverschijnselen mag deze belasting als een kortdurende statische belasting in rekening gebracht worden.

De gereduceerde drukken voor ontlastopeningen van diverse diameters staan in tabel B.3.2.

*Tabel B.3.2: Gereduceerde drukken in de 300 m tunnel, bij onlastopeningen van diverse diameter, zonder rekening te houden met golfverschijnselen. Deze zouden de druk lokaal met een factor 2 kunnen verhogen.*

Gatdiameter [m]	Overdruk salvo 10 x 750 g [kPa]
0,0	6,1
0,5	5,7
1,0	4,5
2,0	1,6

### B.3.3 Consequenties en mogelijke tegenmaatregelen

Behalve dat bij het ontwerp van de tunnelwanden met de QSP rekening gehouden moet worden, heeft de QSP ook enkele andere consequenties. Aangezien deze onderwerpen buiten de offerte zijn gelaten, worden ze hier alleen kort opgesomd. De kruiddampen stromen ook de bedieningsruimten 104 en 101 binnen. Dit is vieze, giftige rook. De overdruk in de bedieningsruimten wordt gelijk aan de overdruk in de tunnel. De druk komt tevens op de ventilatiesystemen te staan.

Er zijn diverse maatregelen mogelijk tegen de QSP en om het binnstromen van de kruiddampen in de bedieningsruimten te verhinderen.

#### 1 Accepteren

De ruimten en systemen moeten dan ontworpen worden op die druk, er mogen geen personen in de ruimten aanwezig zijn tijdens een salvo en de bedieningsruimten moeten geventileerd kunnen worden.

#### 2 Venten

Met een onlastopening in de tunnel kan de QSP gereduceerd worden. Dit is wel moeilijk als dit gecombineerd moet worden met geluidsdemperen en/of stoffilters, gezien de grote benodigde onlastopening. Een gevaar van de oplossing is dat afsluiten van de ventopening druk in de tunnel en bedieningsruimte oplevert. Als de ventopening afsluitbaar is, zal de constructie veiligheidshalve bestand gemaakt moeten worden tegen de volledige QSP.

#### 3 Onlastpaneel in bedieningsruimte

Er kan een onlastpaneel in de bedieningsruimte aangebracht worden, die bezwijkt als de druk in de bedieningsruimte te hoog wordt. Dit voorkomt dus alleen instorten van de bedieningsruimte in extreme situaties, niet het binnstromen van kruiddampen in normale omstandigheden.

#### 4 Gat in tussenwand afdichten

Het is in theorie mogelijk om het schietgat in de tussenwand af te dichten. In de praktijk zal dit lastig zijn en waarschijnlijk niet 100% betrouwbaar.

## 5 *Inertiseren*

Bij de Goalkeeper-schietbaan in Den Helder is inertiseren overwogen. Dit voorkomt naverbranding van de kruitdampen en geeft een verlaging van de QSP. Dit is echter een dure, omslachtige en slechts gedeeltelijke oplossing.

Uitwerken van deze mogelijke maatregelen valt niet binnen de huidige opdracht. Indien hier behoefte toe bestaat, kan TNO-PML wel offerte doen om deze maatregelen uit te werken.

## B.4 Kogelknal

Het energieverlies door luchtwrijving van een 40 mm projectiel ligt in de orde van 1 kJ/m. Als aangenomen wordt dat dit volledig in blastenergie omgezet wordt, krijg je volgens Smolli et al. [1985] dezelfde blast als een bolvormige lading van 0,88 gram. De te verwachten gereflecteerde blastparameters van 0,88 gram TNT op de wanden zijn:

- gereflecteerde druk: 10 kPa;
- gereflecteerde impuls: 2 Pa.s.

De impuls is zo laag dat er geen enkele kans op schade van de wanden is. Bovendien is dit voor een HE-blast berekend. Een kogelknal is een N-golf, die dus eerst overdruk en daarna onderdruk levert. De nettobelasting is dus vrijwel nul. Er hoeft voor de dimensionering van de wanden derhalve geen rekening met de kogelknal gehouden te worden.

## B.5 Detonatie granaat

In de 300 m tunnel wordt ook met brisante munitie geschoten. De projectielen hebben maximaal een netto explosieve massa van 0,150 kg.

De belasting ten gevolge van een detonerende granaat is sterk afhankelijk van de positie van de granaat. Normaal zal een granaat alleen bij de kogelvanger detoneren, op ruime afstand van de wanden. Bij incidenten is het ook voorstellbaar dat de granaat tegen de wand aankomt en daartegen detoneert. De lokale belasting in het laatste geval is ordes van grootte hoger dan in het eerste geval. Het is dan ook niet doelmatig om de tunnelwanden op een contactexplosie van een detonerende granaat te ontwerpen. De opdrachtgever accepteert dan ook schade in zo'n situatie (mits deze lokaal en herstelbaar is). In het volgende wordt uitgegaan van een minimale afstand tot de wand van 0,5 m.

De tunnelwand wordt beschermd door stalen platen. Deze verdelen de belasting van een nabij detonerende granaat. Voor de wand is daarom alleen de gemiddelde blastbelasting van belang. Die gemiddelde belasting kan berekend worden met methoden uit TM 5-1300 [1990]. Voor een granaat die op 0,5 m van de wand detoneert wordt een gemiddelde belasting van 140 Pa.s tot 200 Pa.s gevonden,

afhankelijk van de positie. Hierbij is het gemiddelde over een lengte van 5 m bepaald. De gebruikte methode is vrij grof, zodat een ruime belastingsfactor nodig is. Met een belastingsfactor van 2,0 wordt de ontwerpbelasting 400 Pa.s.

Voor een schatting van de verdeling van de belasting over de rest van de tunnel is een simulatie met het programma Inblast gemaakt [Montanaro en Swisdak, 1990]. In tegenstelling tot de mondingsblast neemt de schok van een detonerende granaat snel af met de afstand (maar nog lang niet zo sterk als in de open lucht). Op 15 m is de impuls met een factor 2 afgenoemd, op 30 m met een factor 3. Daarna is er niet veel afname meer in de impuls. Dit betekent dat de ontwerpbelasting voor de rest van de tunnel 133 Pa.s is.

Op de positie van de deur, 11 m voor de smashplate, is de ontwerpimpuls 220 Pa.s en de ontwerpdruk 70 kPa. De belasting op de deur achter de kogelvanger kan niet geschat worden, aangezien deze deur niet direct door de schokgolven belast wordt. Wel is de belasting natuurlijk lager dan op de deur voor de smashplate.

De schokgolf van de detonerende granaat is dus ongeveer van dezelfde sterkte als de schokgolf van de mondingsblast. Op bepaalde posities zullen de schokgolven van de detonerende granaat en de mondingblast elkaar tegenkomen. Ze zullen daar interfereren, wat plaatselijk een verhoging van de druk en impuls geeft. Hiermee hoeft echter in het ontwerp van de tunnel geen rekening mee gehouden te worden. Bij de mondingsblast is namelijk al rekening gehouden met reflecties (oftewel de echo), wat dezelfde lokale versterking geeft.

## B.6 Gronddruk en eigen gewicht

Grote delen van de tunnels liggen onder een grondtalud en worden dus ook belast met het gewicht van de grond. Verder wordt het dak belast door zijn eigen gewicht. De passieve gronddruk is berekend. De horizontale druk op de wand is minder dan de hydrostatische druk, omdat het zand inwendige wrijving heeft. De gemiddelde druk blijkt 12,9 kPa te zijn. De gronddruk op het dak is 9,4 kPa bij een laagdikte van 0,6 m.

Voor het eigen gewicht wordt uitgegaan van een soortelijk gewicht van beton van 24000 N/m<sup>3</sup>.

## Bijlage C      Berekening van de equivalente statische belasting

### C.1      Inleiding

Deze spreadsheet berekent het equivalent een-massa-veer systeem voor een wand van de schiettunnel van de AB. De berekening is volgens de methoden uit TM 5-1300 [1990]. Ook de notatie is overgenomen van TM 5-1300. Daarna wordt een responsberekening gedaan.  
Deze spreadsheet is gebaseerd op bestaande, Engelstalige spreadsheets.

#### C.1.1      Dimensions

$$\text{length} \quad L = 3200 \cdot \text{mm}$$

$$\text{width} \quad B = 1000 \cdot \text{mm}$$

$$\text{thickness} \quad T = 300 \cdot \text{mm}$$

#### Reinforcement

$$\text{diameter} \quad \phi_I := 16 \cdot \text{mm}$$

$$\text{pitch} \quad b = 130 \cdot \text{mm}$$

$$\text{concrete cover on unloaded} \quad c_p := 0.07 \cdot T \\ \text{(positive) side}$$

$$\text{distance between centroids} \quad d_c := T - 2 \cdot c_p - 2 \cdot \frac{\phi_I}{2} \\ \text{of reinforcement} \\ \text{(Type II or III cross-section)}$$

effective depth  
(Type I cross-section)

$$d_p := T - c_p - \frac{\phi_I}{2}$$

cross-section of reinforcement

$$A_{s1} := \frac{\pi}{4} \cdot \phi_I^2$$

reinforcement ratio

$$p_p = \frac{A_{s1}}{b \cdot d_p}$$

alternative definition of reinforcement ratio

$$p_p := 0.40\%$$

### C.1.2 Material properties

Type of steel: FeB 500

yield strength reinforcement

$$f_y = 1.0 \cdot 500 \cdot MPa$$

ultimate strength reinforcement

$$f_u := 580 \cdot MPa$$

elastic modulus

$$E_s = 210 \cdot GPa$$

Type of concrete: B45

static ultimate compressive strength

$$f_c = 31.875 \cdot MPa$$

(note: short duration value, either lower limit for design or a mean value)

density

$$w_c = 2400 \cdot \frac{kg}{m^3}$$

elastic modulus

$$E_c = \left[ \frac{w_c}{(lb)} \right]^{1.5} \cdot 33 \cdot psi \cdot \sqrt{\frac{f_c}{psi}}$$

$$E_c = 28.372 \cdot GPa$$

$$E_c = \text{GPa}$$

$$\text{Poisson's ratio} \quad \nu = 0.2$$

Dynamic Increase Factors, far field design range.  
No DIFs are used.

$$\text{concrete, bending} \quad DIF_{bb} = 1.00$$

$$\text{concrete, shear (diagonal tension)} \quad DIF_{ba} = 1.00$$

$$\text{concrete, direct shear  
(diagonal reinforcement)} \quad DIF_{bs} = 1.00$$

$$\text{yield strength reinforcement, bending} \quad DIF_{vb} = 1.00$$

$$\text{ultimate strength reinforcement,  
bending} \quad DIF_{tb} = 1.00$$

$$\text{yield strength reinforcement,  
diagonal tension} \quad DIF_{va} = 1.00$$

$$\text{yield strength reinforcement,  
direct shear} \quad DIF_{vds} = 1.00$$

$$\text{ultimate strength reinforcement,  
direct shear} \quad DIF_{tds} = 1.00$$

#### Dynamic strengths

$$\text{concrete, bending} \quad f_{dc} = DIF_{bb} \cdot f_c$$

$$\text{yield strength reinforcement, bending} \quad f_{dy} = DIF_{vb} \cdot f_y$$

$$\text{ultimate strength reinforcement,  
bending} \quad f_{du} = DIF_{tb} \cdot f_u$$

1

#### Design stress (elastic)

$$f_{ds} = f_{dy}$$

$$f_{ds} = 500 \cdot MPa$$

## C.2 Ultimate moment capacity

For Type I cross-section

depth of equivalent rectangular stress block / maximum moment

$$\begin{aligned} a_p &= \frac{p_p \cdot d_p \cdot f_c}{0.85 \cdot f_{dc}} \\ M_p &= B \cdot p_p \cdot d_p \cdot f_c \cdot \left( d_p - \frac{a_p}{2} \right) \end{aligned}$$

$$M_p = 141.461 \cdot kN \cdot m$$

With equal reinforcement on both sides:

$$M_n = M_p$$

Moment of inertia

$$\begin{aligned} \text{of gross concrete section} & I_g = \frac{T^3}{12} \\ \text{ration of elastic moduli} & n = \frac{E_s}{E_c} \end{aligned}$$

$$n = 7.402$$

$$p_p = 0.004$$

Look up  $F$  from Fig. 4.12

$$F = 0.022$$

moment of inertia of cracked concrete section

$$I_c = F \cdot d_p^3$$

Average moment of inertia

$$I_a = \frac{I_g + I_c}{2} \cdot B$$

Ultimate resistance, for a simply supported beam, equally distributed load

**Check load and geometry**

$$R_u = 8 \cdot \frac{M_n + M_p}{L}$$

$$R_u = 707.304 \cdot kN$$

$$r_u = \frac{R_u}{B \cdot L}$$

$$r_u = 221.032 \cdot kPa$$

Elastic resistance

$$R_e = 12 \cdot \frac{M_n}{L}$$

$$R_e = 530.478 \cdot kN$$

Effective elastic stiffness

$$k_e = \frac{384 \cdot E_c \cdot I_a}{L^3}$$

$$k_e = 4.468 \cdot 10^8 \cdot \frac{\text{newton}}{\text{m}}$$

Maximum elastic deflection

$$X_e = \frac{R_e}{k_e}$$

$$X_e = 0.001 \cdot m$$

To insure against sudden compression failures, the reinforcement ratio should not exceed a specific ratio. (for Type I cross-sections)

$$K_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{if } f_{dc} \geq 3000 \cdot \text{psi} \\ 0.85 - 0.05 \cdot \frac{f_{dc} - 4000 \cdot \text{psi}}{1000 \cdot \text{psi}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p_b = 0.85 \cdot K_1 \cdot \left( \frac{f_{dc}}{f_{ds}} \right) \cdot \frac{87000 \cdot \text{psi}}{87000 \cdot \text{psi} + f_{ds}}$$

$$0.75 \cdot p_b = 0.018$$

$$p_p = 0.004$$

**Check whether  $p_p$  is less than  $0.75 p_b$**

$$p_p - 0.75 \cdot p_b = 1$$

### C.3 Equivalent SDOF system

$$\text{mass} \quad M = w_c \cdot B \cdot T \cdot L$$

$$M = 2.304 \cdot 10^3 \cdot \text{kg}$$

Table C.1: Load mass factors

	fixed	simply supported
$K_{LM_e}$	0.77	0.78
$K_{LM_{ep}}$	0.78	
$K_{LM_p}$	0.66	0.66

$$K_{LM_e} = 0.77$$

$$K_{LM_{ep}} = 0.78$$

$$K_{LM_p} = 0.66$$

Elastic equivalent mass and vibration period

$$M_{eqe} = K_{LM_e} \cdot M$$

$$T_{Ne} = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{M_{eqe}}{k_e}}$$

$$T_{Ne} = 12.52 \cdot ms$$

Effective mass and vibration period

$$K_{LM} = K_{LM_e} M$$

$$M_{eq} = K_{LM} M$$

$$M_{eq} = 1.774 \cdot 10^3 \cdot kg$$

$$T_{Neq} = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{M_{eq}}{k_e}}$$

$$T_{Neq} = 12.52 \cdot ms$$

### Summary

$$\text{equivalent mass} \quad M_{eq} = 1.774 \cdot 10^3 \cdot kg$$

$$\text{own weight} \quad M_{eqe} \cdot 9.81 \cdot \frac{m}{sec^2} = 17.404 \cdot kN$$

$$\text{muzzle blast impulse} \quad i_{muz} = 146 \cdot Pa \cdot sec$$

$$\text{momentum due to impulses} \quad L \cdot B \cdot i_{muz} = 467.2 \cdot newton \cdot sec$$

$$\text{stiffness, elastic} \quad k_e = 4.468 \cdot 10^8 \cdot \frac{newton}{m}$$

period of vibration, elastic       $T_{Ne} = 0.013 \cdot \text{sec}$

max. elastic deflection       $X_e = 0.001 \cdot \text{m}$

period of vibration       $T_{Neq} = 0.013 \cdot \text{sec}$

max. deflection       $\frac{L}{2} \cdot \tan\left(\frac{2}{180} \cdot \pi\right) = 0.056 \cdot \text{m}$

## C.4 Definition of the SDOF model

### C.4.1 Initialisation

#### C.4.1.1 Definition of mass

equivalent mass  $M := 1774$

$$M = 1.774 \cdot 10^3$$

#### C.4.1.2 Definition of load

impulse  $i_{muz} := 467.2$

$$i_{muz} = 744.6$$

static load  $F_{stat} := 0$

### Friedlander wave

decay time  
(time between begin and end)  $t_{loadFL} := 0.0015$

decay constant  $\Theta_{loadFL} := 1.1$

peak pressure

$$p_{loadFL} = \frac{i_{muz}}{e^{-\Theta_{loadFL} \cdot \frac{t_{loadFL}}{2}} + \frac{t_{loadFL}}{\Theta_{loadFL}} - \frac{t_{loadFL}}{\Theta_{loadFL}}^2}$$

$$p_{loadFL} = 8.7064 \cdot 10^5$$

begin time  $t_{beginFL} := 0$

area on which the load acts  $A_{loadFL} := 1$

load factor  $K_{LFL} := 1$

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } (t_{beginFL} > t) \vee (t > t_{beginFL} + t_{loadFL}) \\ K_{LFL} \cdot A_{loadFL} \cdot p_{loadFL} \cdot \left(1 - \frac{t - t_{beginFL}}{t_{loadFL}}\right) \cdot e^{-\Theta_{loadFL} \frac{t - t_{beginFL}}{t_{loadFL}}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

### Plot of load

Definition of time (for plotting of force function only)

number of points in plot	$i_{max} = 50$
step number	$i = 0 .. i_{max}$
start time	$t_{begin} = 0$
end time	$t_{end} = 0.002$
step time	$\Delta t = \frac{t_{end} - t_{begin}}{i_{max}}$
time array	$t_i = t_{begin} + i \cdot \Delta t$

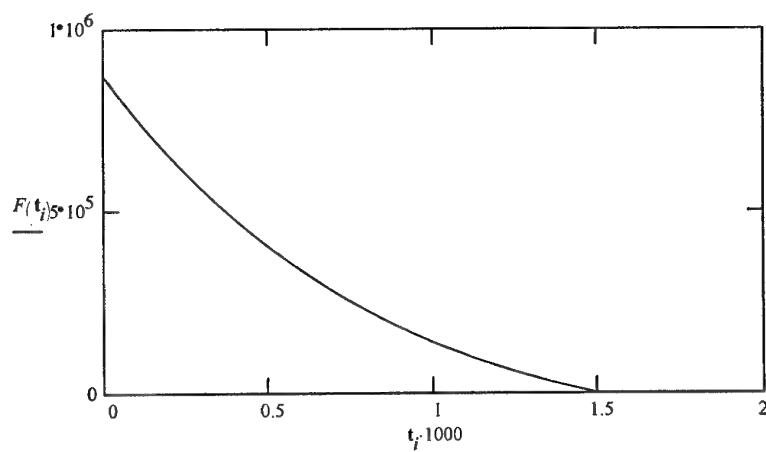


Figure C.4.1: Force versus time

#### C.4.1.3 Definition of resistance

##### Linear resistance

$$\begin{aligned} \text{elastic stiffness} \quad k_{el} &:= 4.468 \cdot 10^8 \\ k_{el} &= 4.468 \cdot 10^8 \\ R(x) &:= k_{el}x \end{aligned}$$

**Plot of resistance**

Definition of displacement (for plotting of resistance function only)

$$\begin{aligned} \text{number of points in plot} \quad i_{max} &:= 50 \\ \text{step number} \quad i &= 0..i_{max} \\ \text{start displacement} \quad x_1 &:= -0.3 \\ \text{end displacement} \quad x_2 &:= 0.3 \\ \text{step} \quad \Delta x &:= \frac{x_2 - x_1}{i_{max}} \\ \text{displacement array} \quad x_i &:= x_1 + i \cdot \Delta x \end{aligned}$$

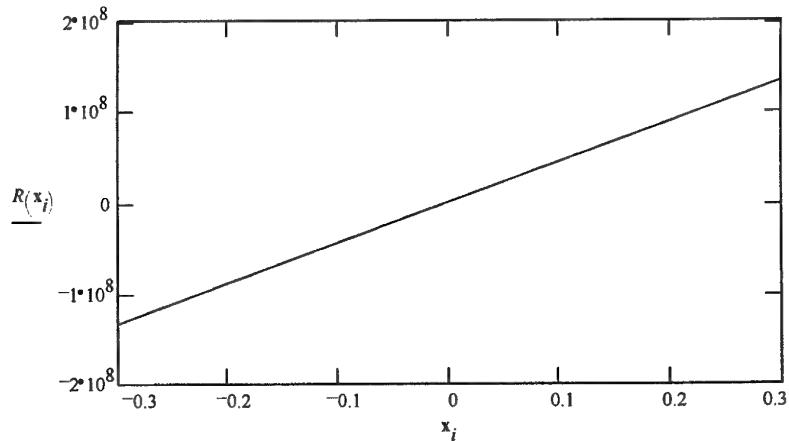


Figure C.4.2: Resistance versus displacement

**C.4.1.4 Definition of damping**

$$\text{damping factor} \quad f_d := 0$$

$$FD(v) := f_d v$$

#### C.4.1.5 Definition of initial conditions

initial displacement	$x_0 := \frac{F_{stat}}{k_{el}}$
initial velocity	$v_0 := 0$

### C.5 Integration of equations of motion

The equation of motion is a second order non-linear differential equation:

$$x''/M + FD(x') + R(x) - F(t) = 0$$

The initial conditions are:

$$\mathbf{x} := \begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \end{pmatrix}$$

The definition of the first and second derivative:

$$\mathbf{D}(t, \mathbf{x}) := \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \frac{F(t) - R(\mathbf{x}_0) - FD(\mathbf{x}_1)}{M} \end{pmatrix}$$

The numerical integration. Occasionally, a different integration scheme can be better, for example with stiff problems. See the Mathcad manual.

number of points in integration  $i_{max} := 100$

$i := 0..i_{max}$

start time  $t_{begin} := 0$

end time  $t_{end} := 0.01$

$$\mathbf{A} = rkfixed(\mathbf{x}, t_{begin}, t_{end}, i_{max}, \mathbf{D})$$

The acceleration at point  $i_A$ :

point	$i_A := 0$
time	$t_A := \mathbf{A}_{i_A, 0}$
displacement	$\mathbf{x}_{\mathbf{A}_0} := \mathbf{A}_{i_A, 1}$
velocity	$\mathbf{x}_{\mathbf{A}_1} := \mathbf{A}_{i_A, 2}$

$$t_A = 0 \quad \mathbf{x}_{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

The acceleration is:

$$\mathbf{D}(t_A, \mathbf{x}_{\mathbf{A}})_1 = 490.7776$$

## C.6 Results

### C.6.1 Figures

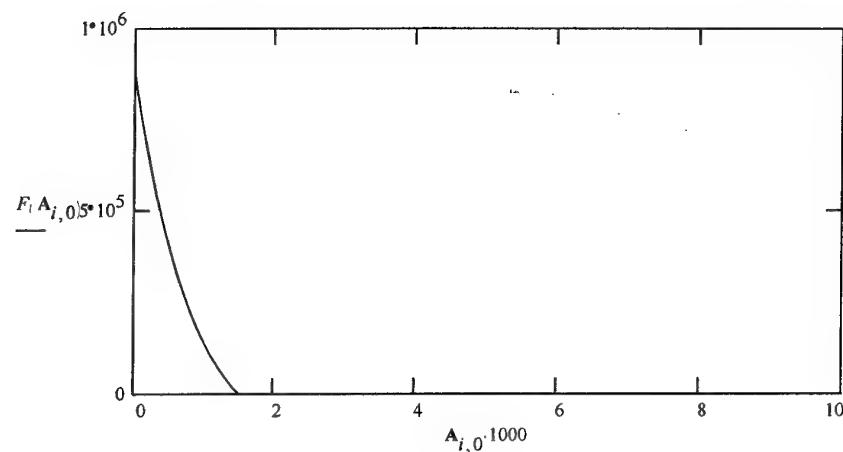


Figure C.6.1: Force versus time

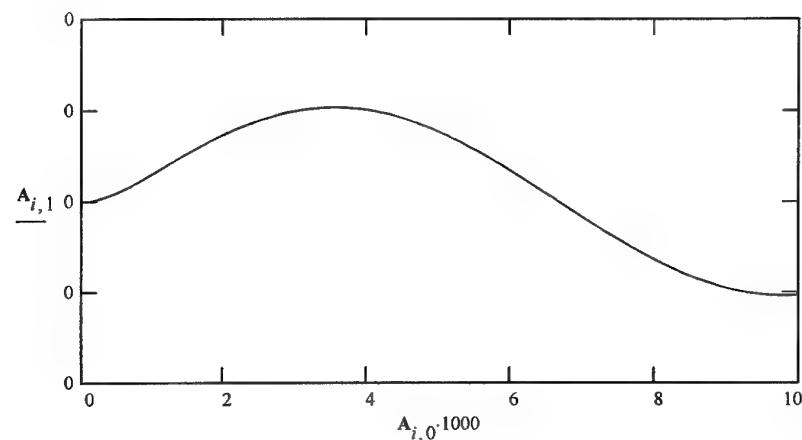


Figure C.6.2: Displacement versus time

Maximum displacement is:  $\max(A^{<1>}) = 5.177 \cdot 10^{-4}$

Minimum displacement is:  $\min(A^{<1>}) = -5.1788 \cdot 10^{-4}$

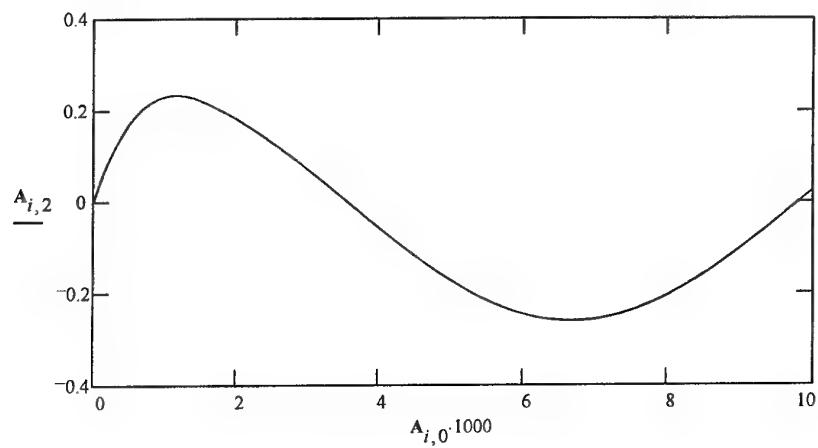


Figure C.6.3: Velocity versus time

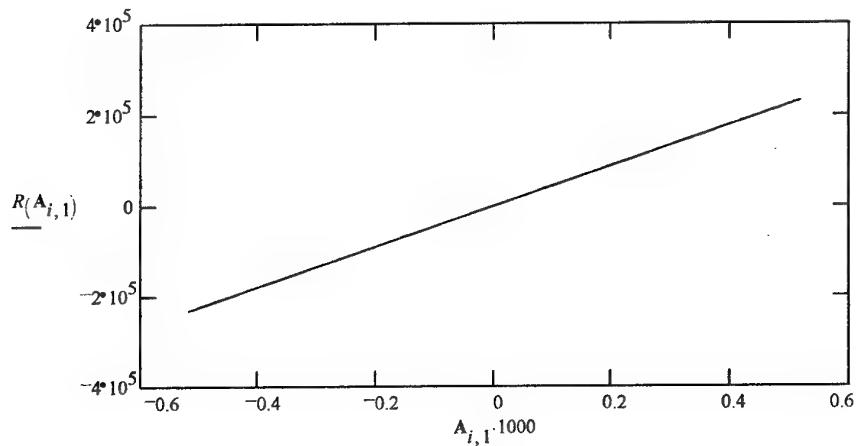


Figure C.6.4: Resistance versus displacement

## Bijlage D      Vergelijking van berekende mondingsblast met meetresultaten

Deze bijlage beschrijft een experimentele validatie van de berekeningen die in bijlage A zijn uitgevoerd met het programma BLAST. Voor deze validatie is gebruikgemaakt van resultaten van geluidsmetingen door TNO-TPD aan het wapen 40L70 [Beeks, 1993 en 1994]. Door rekenresultaten voor de 40L70 te vergelijken met de meetresultaten zijn conclusies getrokken over de nauwkeurigheid van de berekeningen met BLAST.

### D.1      Inleiding

Een probleem bij de validatie is dat de berekeningen met BLAST zijn uitgevoerd tot maximaal 2 tot 4 m afstand van de vuurmond. Op dergelijke kleine afstanden spelen niet-lineaire akoestische effecten nog een belangrijke rol bij de voortplanting van de drukgolven. Dit betekent dat de drukgolven met toenemende afstand tot het wapen van vorm veranderen. Pas vanaf een afstand van circa 10 m blijft de vorm van de drukgolf ongeveer gelijk (en daarmee ook het geluidsspectrum van de drukgolf). Geluidsmetingen worden daarom gewoonlijk op een afstand van 10 of 20 m van de vuurmond uitgevoerd. De rekenresultaten van BLAST kunnen daarom niet direct vergeleken worden met de resultaten van geluidsmetingen, maar moeten eerst geëxtrapoleerd worden naar de afstand waarop de geluidsmetingen zijn uitgevoerd. Voor deze extrapolatie zijn twee methodes gebruikt: een numerieke methode (NPE) en een analytische methode. Deze twee methodes houden rekening met niet-lineaire akoestische verschijnselen, en zullen in paragraaf D.2 kort beschreven worden. De aldus berekende druksignalen zijn omgerekend tot zogenaamde bronspectra, die direct vergeleken kunnen worden met bronspectra die bepaald zijn voor de 40L70 op basis van metingen uitgevoerd op afstanden van 25 m en 56 m van de vuurmond, in verschillende richtingen.

Opgemerkt moet worden dat de startparameters voor de berekeningen met BLAST zodanig gekozen zijn dat berekende druksignalen op korte afstand van de vuurmond (1 tot 1,8 m) het best overeenkomen met aldaar gemeten druksignalen. Deze keuze garandeert dus dat de berekeningen op korte afstand overeenkomen met de metingen.

### D.2      Rekenmethodes voor propagatie van drukgolven

#### D.2.1    Numerieke rekenmethode NPE

De door TNO-TPD ontwikkelde numerieke rekenmethode NPE is gebaseerd op een artikel van McDonald en Kuperman [1987]. NPE staat voor 'Nonlinear Pro-

gressive wave Equation'. Met NPE kan de propagatie van een min of meer willekeurige drukpuls in de atmosfeer berekend worden. Hierbij kan rekening worden gehouden met een reflecterende bodem, en ook met lokale variaties van de geluidssnelheid ten gevolge van windprofielen en temperatuurprofielen in de atmosfeer. Uitgaande van een puls op korte afstand van de bron wordt het volledige drukveld berekend door stapsgewijs van de bron af te extrapoleren. Hiervoor gebruiken we een eindige-differentiemethode ('second-order upwind differencing scheme with the flux correction method').

Bij de hieronder gepresenteerde berekeningen voor de 40L70 wordt uitgegaan van propagatie in het vrije veld, zonder bodem en atmosferische gradiënten. Het bron-spectrum is namelijk gecorrigeerd voor de invloed van de bodem, terwijl atmosferische gradiënten geen rol spelen bij propagatie over korte afstanden.

#### D.2.2 Analytische rekenmethode

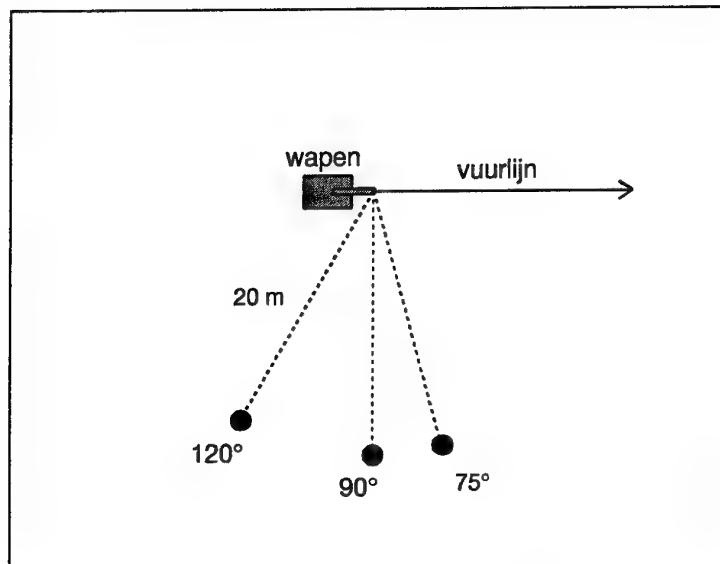
De voortplanting in het vrije veld van niet-lineaire bolgolven kan ook analytisch berekend worden [Pierce, 1991] en [Whitham, 1974]. De berekening is gebaseerd op een niet-lineaire golfvergelijking en de zogenaamde 'equal-area rule'.

Niet-lineaire termen in de golfvergelijking zorgen voor een opsteiling van geluidsgolven. Met behulp van de 'equal-area rule' kunnen niet-fysische oplossingen met meervoudige drukken vervangen worden door fysische oplossingen (schokgolven).

De analytische methode gaf voor de hieronder beschreven berekeningen voor de 40L70 goede overeenstemming met de numerieke methode NPE.

#### D.3 Uitgevoerde berekeningen

Figuur D.1 toont een schematisch bovenaanzicht van de geometrie waarvoor gerekend is. Er zijn drie ontvangers op 20 m afstand van de vuurmond, onder hoeken van respectievelijk 75°, 90° en 120° met de vuurlijn. Er zijn druksignalen berekend voor deze drie ontvangers, en deze vervolgens omgerekend tot bronspectra voor de drie hoeken. Deze bronspectra zullen vergeleken worden met bronspectra die bepaald zijn op basis van metingen op 25 m voor de drie richtingen [Beek e.a., 1994].



*Figuur D.1: Bovenaanzicht van wapen met drie microfoons onder hoeken van 75°, 90° en 120° met de vuurlijn.*

#### D.4 Begintoestanden

Figuur D.2 toont drukvelden berekend met BLAST voor de 40L70 op zes opvolgende tijdstippen. Startcondities voor de berekeningen met BLAST waren: druk 18 MPa, temperatuur 1650 K en snelheid 1040 m/s (in de loop).

Figuur D.3 toont de druksignalen in de richting 90° op de zes tijdstippen. Het signaal bevat een drukgolf die zich voortplant met een snelheid van ongeveer 340 m/s, naast een verstoring van de druk die in de buurt van de vuurmond blijft. Alleen de lopende drukgolf is van belang voor de geluidsafstraling naar de omgeving.

Voor de berekeningen van de signalen op 20 m afstand is uitgegaan van de resultaten van de berekeningen met BLAST op tijdstip  $t = 4.42$  ms. Op dit tijdstip had de drukgolf nog net de rand van het systeem niet bereikt (zie figuur D.2). Voor de drie richtingen zijn golfvormen gekozen die op het oog het best overeenkomen met de resultaten van de berekeningen met BLAST (zie figuur D.4). Deze golfvormen representeren alleen de lopende drukgolf.

## D.5 Resultaten

Figuur D.5 toont berekende en gemeten bronspectra voor de richting 90°. Het berekende spectrum komt redelijk overeen met het spectrum dat gebaseerd is op de meting in oktober 1994 (op 56 m afstand), maar minder goed met het spectrum dat gebaseerd is op de meting in september 1993 (op 25 m afstand). Kennelijk kunnen er aanzienlijke verschillen in geluidsemissie optreden, voor hetzelfde wapentype. De oorzaak van deze verschillen is niet duidelijk; er loopt bij TNO-TPD momenteel een onderzoek naar dit onderwerp.

Opgemerkt moet worden dat de meetsignalen die gebruikt zijn om de startcondities te bepalen voor de berekeningen met BLAST geregistreerd zijn in september 1993, dat wil zeggen tijdens de metingen waarbij ook de geluidssignalen zijn geregistreerd die minder goed overeenkomen met de rekenresultaten (zie figuur D.5). Dus, terwijl de overeenstemming tussen meting en berekening op korte afstand automatisch goed is, treden er op 20 m afstand toch aanzienlijke verschillen op.

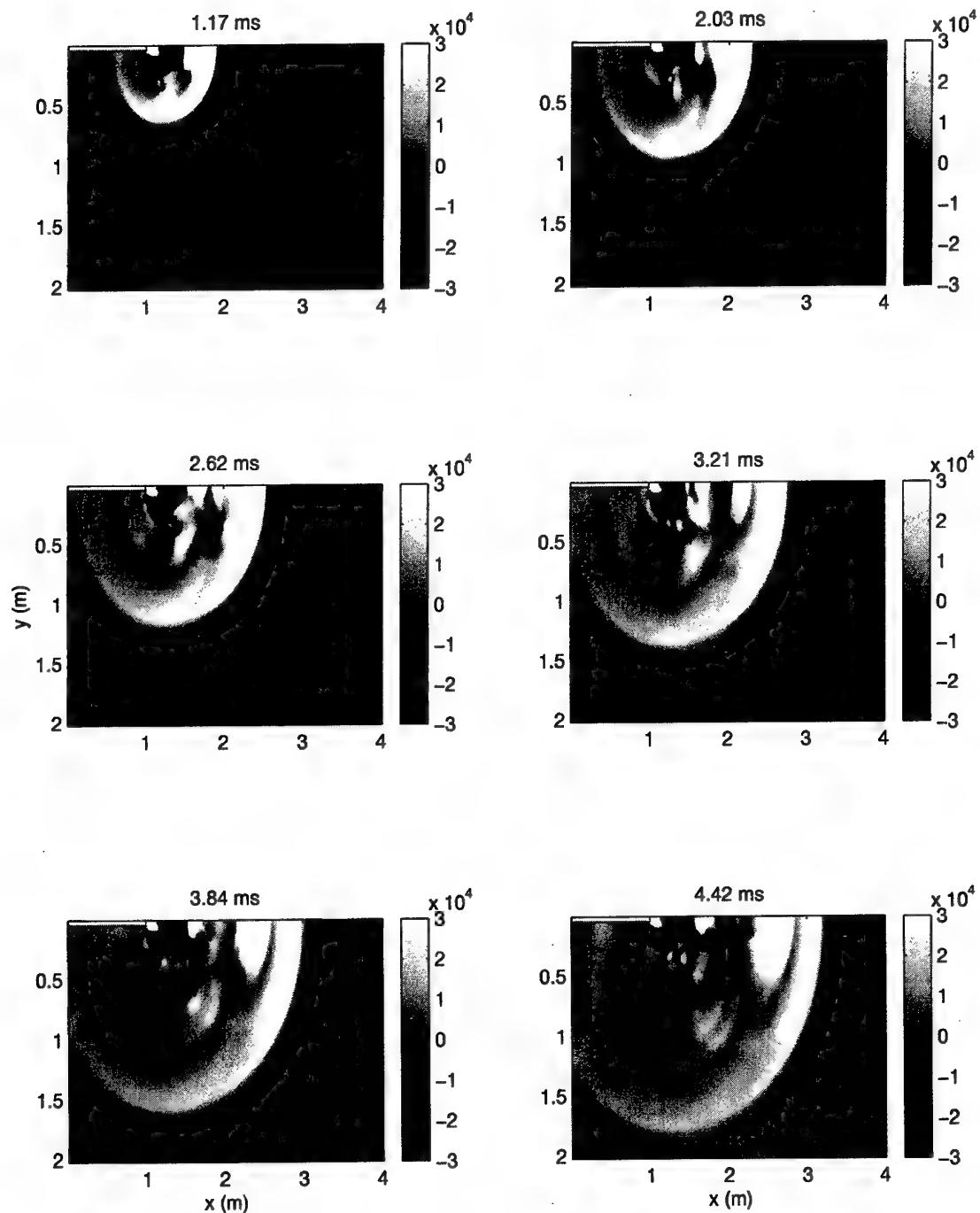
Figuur D.6 toont berekende en gemeten spectra voor de drie richtingen 75°, 90° en 120° (de spectra voor 90° zijn ook afgebeeld in figuur D.5). De gemeten spectra zijn gebaseerd op de metingen in september 1993. Zowel de gemeten als de berekende spectra laten zien dat de geluidsdrukniveaus in de verschillende octaafbanden afnemen met toenemende hoek tot de vuurlijn.

## D.6 Conclusies

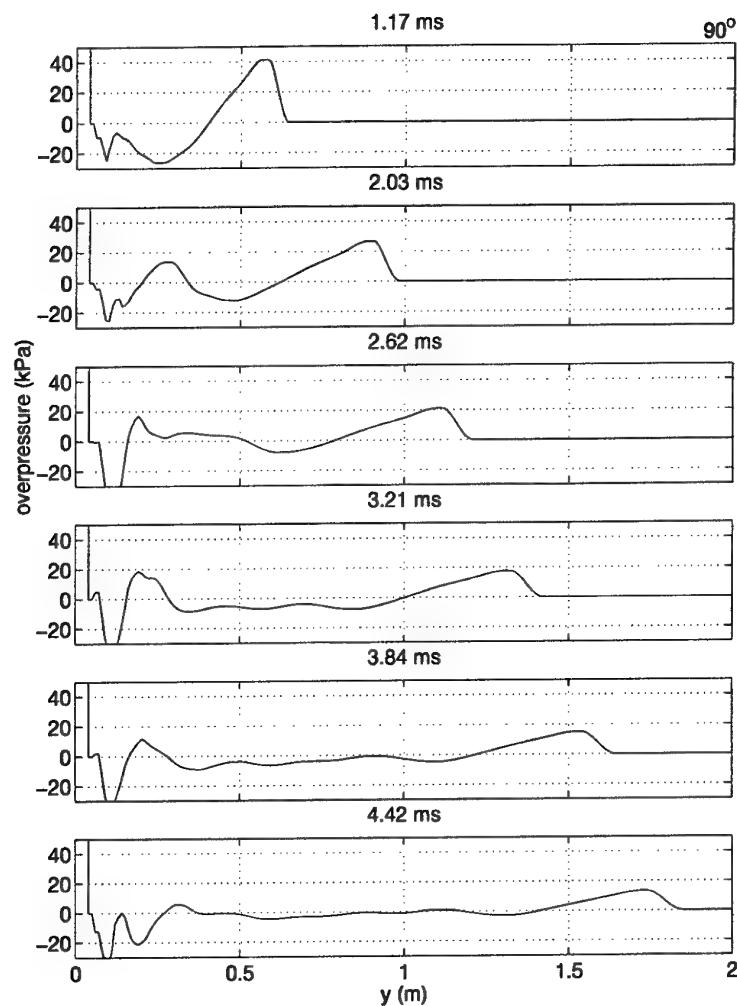
De waargenomen verschillen tussen meting en berekening bedragen maximaal ongeveer 10 dB (zie figuur D.5). Dit zou een verschil in de geluidsdruk van een factor drie betekenen. De meting van oktober 1994 geeft echter aanzienlijk kleinere verschillen. Kennelijk kunnen er aanzienlijke verschillen in geluidsemissie optreden, voor hetzelfde wapentype.

De berekende variatie van het bronspectrum met de hoek tot de vuurlijn komt goed overeen met de gemeten variatie. Met toenemende hoek tot de vuurlijn nemen de niveaus af.

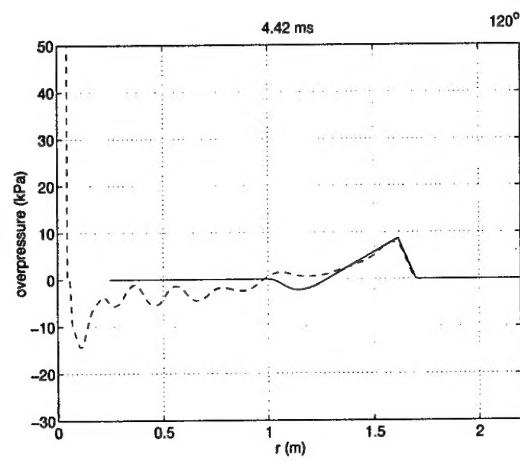
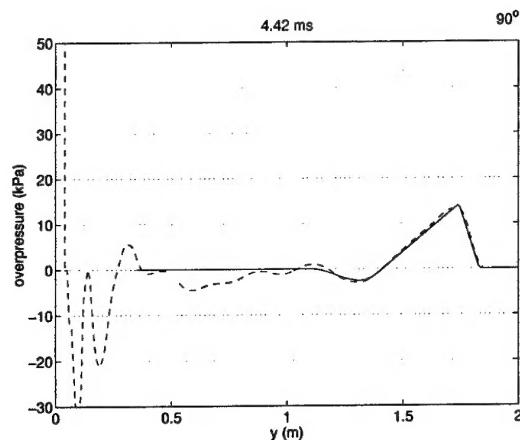
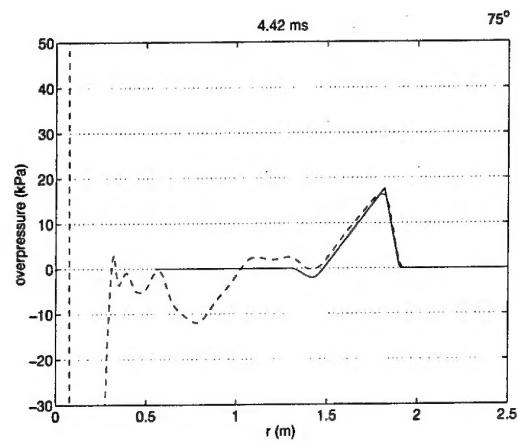
Verder is in dit onderzoek gebleken dat resultaten van berekeningen met BLAST goed bruikbaar zijn als begincondities voor berekeningen van voortplanting van drukgolven naar grotere afstanden, volgens de NPE-methode. Het is wel aan te bevelen om met BLAST tot iets grotere afstand van de vuurmond te rekenen dan de nu gekozen maximale afstand van 2 tot 4 m.



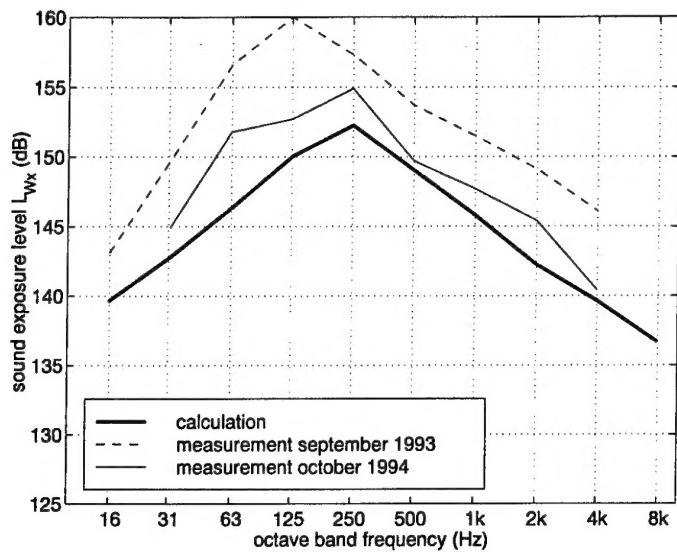
Figuur D.2: Drukvelden berekend met BLAST voor zes tijdstippen. De grijswaarde representeert de druk in Pa. De loop bevindt zich op  $y = 0$ , de vuurmond op  $(x, y) = (1,0)$ .



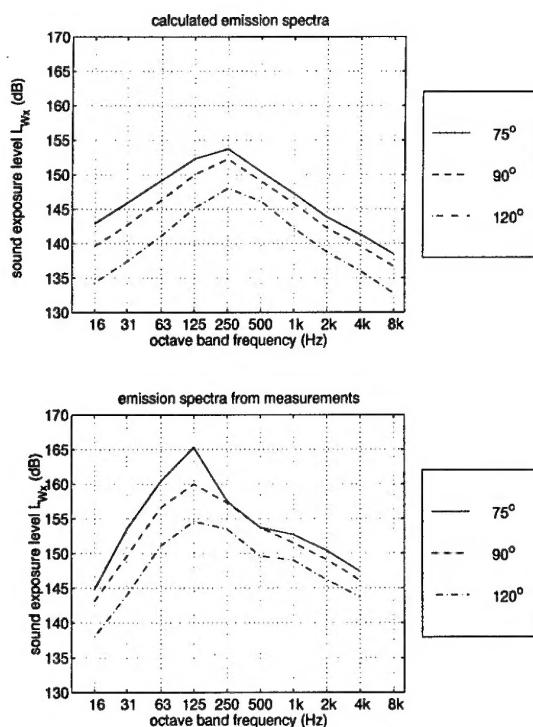
*Figuur D.3: Druksignalen in de richting 90° op zes verschillende tijdstippen  
(dat wil zeggen doorsneden langs de lijn x = 1 m van de velden uit  
figuur D.1).*



*Figuur D.4: Signalen berekend met BLAST (--) en 'fits' voor berekening van signalen op 20 m (-).*



*Figuur D.5: Berekende bronspectra en bronspectra bepaald op basis van twee metingen aan de 40L70, voor de richting 90°.*



*Figuur D.6: Berekende en gemeten spectra voor de 40L70, voor de drie richtingen.*

## REPORT DOCUMENTATION PAGE (MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO. (MOD-NL) TD98-0297	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO.	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. PML 1998-A56
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 224097751	5. CONTRACT NO. A98KL430	6. REPORT DATE October 1998
7. NUMBER OF PAGES 57 (incl. 4 annexes, excl. RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 21	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final

**10. TITLE AND SUBTITLE**

Berekening van de ontwerpbelastingen voor de nieuwbouw van DMKL/AB te Oldebroek  
(Calculation of the design loads for the new firing ranges of DMKL/AB at Oldebroek, The Netherlands)

**11. AUTHOR(S)**

R.M.M. van Wees, A.C. van den Berg and Dr. E.M. Salomons (TNO-TPD-TU Delft)

**12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)**

TNO Prins Maurits Laboratory, P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands  
Lange Kleiweg 137, Rijswijk, The Netherlands

**13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)**

DGW&T/Directie Gelderland  
P.O. Box 1060, 7301 BH Apeldoorn, The Netherlands

**14. SUPPLEMENTARY NOTES**

The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified.

**15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE))**

The design loads for an enclosed firing range were determined. It turned out that the muzzle blast contributed the most to the overall load.

**16. DESCRIPTORS**

Fire walls  
Loading rate  
Loads (forces)

**DESCRIPTORS**

Range gating  
Range safety  
Ranges (facilities)

**17a. SECURITY CLASSIFICATION  
(OF REPORT)**

Ongerubriceerd

**17b. SECURITY CLASSIFICATION  
(OF PAGE)**

Ongerubriceerd

**17c. SECURITY CLASSIFICATION  
(OF ABSTRACT)**

Ongerubriceerd

**18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT**

Unlimited Distribution

**17d. SECURITY CLASSIFICATION  
(OF TITLES)**

Ongerubriceerd

**Distributielijst\***

- 1 DWO
- 2 HWO-KL
- 3\* HWO-KLu
- 4\* HWO-KM
- 5\* HWO-CO
- 6/10 DGW&T/Directie Gelderland  
Ing. W.R. de Graaf
- 11 DGWT/CD  
Ir. D. Boon
- 12 DGWT/CD  
Ing. P.I.J. van der Weele
- 13 DM&P TNO-DO
- 14\* DM&P TNO-DO, accountcoördinator KL
- 15\* TNO-FEL, Bibliotheek
- 16/18 Bibliotheek KMA
- 19\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. ir. J.A. Schot
- 20\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. ir. K.F. Wakker
- 21\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
BGen. Prof. J.M.J. Bosch
- 22\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
Ir. A.H.P.M. Schaeken
- 23 TNO-PML, Directie; daarna reserve
- 24 TNO-PML, Hoofd Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid  
Ir. P.A.O.G. Korting
- 25/27 TNO-PML, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid,  
Groep Explosiepreventie en Bescherming  
Dr. ir. J. Weerheim, Ir. R.M.M. van Wees en Ir. A.C. van den Berg
- 28/29 TNO-TPD-TU Delft  
Dr. E.M. Salomons
- 30 TNO-PML, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid,  
Groep Explosiepreventie en Bescherming, reserve
- 31 TNO-PML, Documentatie
- 32 TNO-PML, Archief

---

\* De met een asterisk (\*) gemerkte instanties/personen ontvangen uitsluitend de titelpagina, het managementuittreksel, de documentatiepagina en de distributielijst van het rapport.